



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Télécommunications
Réseaux et télécommunications

Réf. :

Présenté et soutenu par :
CHERGUI Sofia

Le : samedi 6 juillet 2019

Conception et réalisation d'un système de communication bureautique par lumière visible (Li-Fi)

Jury :

Mme. OUARHLENT Saloua	MAA	Université de Biskra	Président
M. AMEID Sofiane	MAA	Université de Biskra	Examineur
Dr. ABDESSELAM Salim	MCB	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2018 – 2019

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Télécommunications
Option : Réseaux et télécommunications

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

Conception et réalisation d'un système
de communication bureautique par lumière visible
(Li-Fi)

Présenté par :
CHERGUI Sofia

Avis favorable de l'encadreur :
Dr. ABDESSELAM Salim

Avis favorable du Président du Jury

Mme. OUARHLENT Saloua

Cachet et signature

Dédicace

A tous ceux qui ont un jour cru en moi.

A tous ceux qui m'ont encouragé.

Ceci n'aurait pas été possible sans vous.

Remerciement

Mes remerciements reviennent en premier lieu à Allah, le Tout Puissant, le Clairvoyant, pour tous ses innombrables bienfaits; pour m'avoir accordé la force, le courage et la volonté à finir ce travail.

« Si vous êtes reconnaissants, très certainement, J'augmenterai [Mes bienfaits] pour vous. » { Sourate Ibrahim : verset 7 }

Je tiens à remercier chacun des membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner et d'évaluer mon travail.

Je souhaite également exprimer ma sincère reconnaissance à mon tuteur de thèse, Dr ABDESSELAM Salim, qui s'est montré à l'écoute et disponible pour m'orienter et me conseiller tout au long de mon projet. Sans lui, la conception de mon système n'aurait pu être achevée.

Un particulier remerciement à toutes les personnes qui étaient là pour m'aider au sein du laboratoire de génie électrique de l'université Mohamed Khider. Une pensée particulière au chef du laboratoire, Mr ADJAL Hamza, ainsi qu'à Mlle LAZHARI Hanine qui ont dû supporter mes nombreux allers-retours. Une pensée également à Mr HEZABRA Adel, qui n'a pas hésité à me partager ses connaissances lors de mes différents tests effectués au sein du laboratoire.

Comment pouvoir être là à remercier toutes ces personnes si l'on ne pas enseigné et formé au cours de mon cursus universitaire. Merci à tous ces enseignants qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et m'ont permis d'être là aujourd'hui.

Ces remerciements seront inachevés si je ne parle pas de toutes ces personnes qui ont été présentes par des conseils, par des encouragements ou encore par des invocations pour me voir réussir un jour. A toute ma famille, à tous mes amis, merci.

« Celui qui ne remercie pas les gens n'a pas remercié Allah ». { Hadith rapporté par Abou Daoud dans ses Sounan n°4811 }

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Classification des périphériques IEEE 802.15.7.....	22
Tableau I.2 : Modes de fonctionnement de la couche PHY.....	24
Tableau II.1 : Caractéristiques des techniques de modulation du Li-Fi.....	46
Tableau II.2 : Li-Fi vs Wifi.....	52
Tableau III.1 : Caractéristiques d'une carte Arduino UNO.....	61
Tableau III.2 : Caractéristiques des photodétecteurs.....	84

Liste des figures

Figure 1 : Trafic global des données mobiles.....	13
Figure 2 : Carte d'attribution des fréquences aux Etats-Unis.....	14
Figure I.1 : Spectre électromagnétique.....	18
Figure I.2 : Dispositifs d'émission et de réception du photophone.....	19
Figure I.3 : Schéma fonctionnel d'un système VLC.....	20
Figure I.4 : Architecture de périphérique VLC sous la norme IEEE 802.15.7	23
Figure I.5 : Multiplexage des types de PHY.	24
Figure I.6 : Format de la trame PHY.....	25
Figure I.7 : Interactions des services de la couche MAC.....	26
Figure I.8 : Format de la trame MAC.....	27
Figure I.9 : Topologies MAC prises en charge par IEEE 802.15.7.....	27
Figure I.10 : Schéma de modulation OOK.....	29
Figure I.11 : Modulation VPPM.....	29
Figure I.12 : Modulation CSK.....	30
Figure II.1 : Architecture d'un système Li-Fi.....	42
Figure II.2 : Fonctionnement d'un réseau Li-Fi.....	44
Figure II.3 : Technique de modulation du Li-Fi.....	46
Figure II.4 : Allocation de ressource pour TDMA et OFDMA.....	48
Figure III.1 : Schéma synoptique d'un système de transmission numérique.....	59
Figure III.2 : Schéma synoptique du système de communication Li-Fi réalisé.....	60
Figure III.3 : Anatomie d'une carte Arduino UNO.....	61
Figure III.4 : IDE Arduino.....	63
Figure III.5 : LEDs.....	64
Figure III.6 : LDR.....	64
Figure III.7 : Module LDR Arduino.....	65
Figure III.8 : Photodiode.....	65
Figure III.9 : Phototransistor.....	66
Figure III.10 : Transistor 2N222.....	66
Figure III.11 : Transistor BD139.....	67
Figure III.12 : Montage d'émission.....	67
Figure III.13 : Montage de réception.....	68
Figure III.14 : Système réalisé au laboratoire.....	68
Figure III.15 : Montage émission et réception en mode duplex.....	69
Figure III.16 : Organigramme d'émission et de réception.....	71

Liste des figures

Figure III.17 : Fenêtres du moniteur série.	72
Figure III.18 : Signaux de transmission visualisés via l'oscilloscope.....	72
Figure III.19 : Visualisation de l'envoi du caractère « a ».	73
Figure III.20 : Structure de l'algorithme AES.....	75
Figure III.21 : Structure du mode CBC.	76
Figure III.22 : Chiffrement AES-CBC.	77
Figure III.23 : Déchiffrement AES-CBC.	78
Figure III.24 : Codage Base64.....	79
Figure III.25 : Décodage Base64.....	80
Figure III.26 : Décodage et décryptage.	80
Figure III.27 : Test de la communication avec différentes distances.	81
Figure III.28 : Visualisation via l'oscilloscope du signal reçu par la LDR.	82
Figure III.29 : Visualisation du signal reçu par le phototransistor.	83
Figure III.30 : Variation de la rapidité en fonction de la distance.....	84

Acronymes

ACO : Asymmetrically Clipped Optical

ADC : Analog Digital Converter

AES : Advanced Encryption Standard

APD : Avalanche PhotoDiode

ASCII : American Standard Code for Information Interchange

BER : Bit Error Rate

CAGR : Compound Annual Growth Rate

CBC : Cipher Block Chaining

CFB : Cipher FeedBack

CPL : Courant Porteur en Ligne

CSK : Color Shift Keying

CTR : Counter

DAC : Digital Analog Converter

DCO : Direct Current biased Optical

DD : Direct Detected

DME : Device Management Entity

DSP : Digital Signal Processor

DSSS : Direct Sequence Spread Spectrum

ECB : Electronic CodeBook

EMI : ElectroMagnetic Interference

FCS : Frame Control Sequence

FDM : Frequency Division Multiplexing

HCS : Header Check Sequence

IDE : Integrated Development Environment

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers

IM : Intensity Modulated

IoT : Internet of Things

IR : InfraRed

IrDA : Infrared Data Association

ISI : Inter-Symbol Interference

IV : Initialization Vector

JEITA : Japan Electronics and Information Technology Industries Association

LCD : Liquid Crystal Display

LED : Light Emitting Diode

Li-Fi : Light Fidelity

LLC : Logical Link Control

LoS : Line of Sight

LPF : Low Pass Filter

LDR : Light Dependent Resistor

MAC : Media Access Control

MCM : Multiple Carrier Modulation

MCPS : MAC Common Part Sublayer

MCU : MicroController Unit

MFR : MAC Footer

MHR : MAC Header

MIME : Multipurpose Internet Mail

Acronymes

MIMO : Multiple Input-Multiple Output

MLME : MAC Layer Management Entity

MSDU : MAC Service Data Unit

N_{LOS} : No Line of Sight

O_{CC} : Optical Camera Communication

O_{FB} : Output FeedBack

O_{FD}**M** : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

O_{FD}**M****A** : Orthogonal Frequency Division Multiple Access

O_{OK} : On Off Keying

O_{WC} : Optical Wireless Communications

P_D : Physical layer Data

P_{HR} : Physical layer Header

P_{HY} : Physical layer

P_{IN} : Positive Intrinsic Negative

P_K**C****S** : Public Key Cryptography Standards

P_L**M****E** : Physical Layer Management Entity

P_P**D****U** : Physical layer Data Unit

P_P**M** : Pulse Position Modulation

P_S**D****U** : Physical layer Service Data Unit

P_W**M** : Pulse Width Modulation

R_F : Radio Frequency

R_L**L** : Run Length Limited

S_{AP} : Service Access Point

S_{CM} : Single Carrier Modulation

S_{DK} : Software Development Kit

S_{HR} : Synchronization Header

S_{IN}**R** : Signal to Interference plus Noise Ratio

S_{SC}**S** : Service Specific Convergence Sublayer

S_{SL} : Solid State Lighting

T_{CA} : Transconductance

T_D**M****A** : Time Division Multiple Access

T_I**A** : Transimpedance

U_V : Ultraviolet

V_{LC} : Visible Light Communication

V_L**C****C** : Visible Light Communication Consortium

V_P**A****N** : VLC Personal Area Network

V_P**P****M** : Variable Pulse Position Modulation

Résumé

Résumé

Le nombre d'appareils se connectant sur Internet via une communication sans fil ne cesse d'augmenter. La capacité de la bande passante disponible pour le spectre des radio fréquences est limitée et insuffisamment capable de supporter la demande sans cesse croissante des connections sans fil. L'utilisation des communications par lumière visible peut être une solution à ce problème. Ce projet présente la technologie des communications par lumière visible qui utilise la lumière disponible dans le spectre visible comme support de transmission. La technologie Li-Fi est à son tour présentée. C'est un système de communication sans fil dans lequel la lumière est utilisée comme signal porteur au lieu de la fréquence radio traditionnelle comme dans le Wi-Fi. Dans ce projet, un prototype d'un système Li-Fi conçu à partir de LEDs pour l'envoi des données a été proposé. La transmission a été testée et analysée en utilisant des photodétecteurs au niveau de la réception.

Mots clés : Li-Fi (Light Fidelity), VLC (Visible Light Communication), LED (Light Emitting Diode), photodétecteur, LDR (Light Dependent Resistor), phototransistor, photodiode, Arduino.

Abstract

The number of devices connecting to the Internet via wireless communications is increasing. The available bandwidth capacity for the Radio Frequency is limited. It can't support continuously the ever-increasing demand for wireless connection. The visible light communication technology usage as a solution of this issue. This project presents the visible light communication technology which that uses light available in the visible spectrum as a transmission medium. Li-Fi technology is presented in this project. It is a wireless communication system in which light is used as a carrier signal instead of traditional waves as in Wi-Fi. In this project, we propose a basic design prototype of an Li-Fi system which is builded by LEDs to transmit data. This transmission prototype is there tested and analysed with a photodetectors in the reception.

Keywords : Li-Fi (Light Fidelity), VLC (Visible Light Communication), LED (Light Emitting Diode), photodetector, LDR (Light Dependent Resistor), phototransistor, photodiode, Arduino.

ملخص

سعة النطاق الترددي المتاحة للطيف الكهرومغناطيسي محدودة وغير قادرة على دعم الطلب المتزايد على البيانات اللاسلكية. يقدم هذا المشروع تقنية اتصالات الضوء المرئي التي تستخدم الضوء المتوفر في الطيف المرئي كوسيلة نقل. تم تقديم تقنية Li-Fi و هي تقنية اتصال لاسلكي يستخدم فيه الضوء كإشارة حاملة بدلاً من تردد الراديو التقليدي كما هو الحال في Wi-Fi ، كما تم مناقشة تصميم مثل هذا النظام. لقد تم تصميمه باستخدام مصابيح LED كمنبع ضوئي واستعمال كاشف ضوئي كمستقبل. يتم التحكم فيها جميعاً بواسطة وحدات تحكم دقيقة من Arduino. التوصل أثناء التنوير يمكن أن يكون مستقبل الإنترنت.

الكلمات المفتاحية : Li-Fi (الدقة الضوئية)، VLC (اتصالات الضوء المرئي)، LED (الصمام الثنائي الباعث للضوء)، الكاشف الضوئي، LDR (المقاومة المعتمدة على الضوء)، الترانزستور الضوئي، الثنائي الضوئي، Arduino.

Table des matières

Introduction générale	13
Chapitre 1 : Introduction aux communications par lumière visible	
I.1 Introduction	17
I.2 Généralités	17
I.3 Historique des communications par lumière visible.....	18
I.4 Architecture d'un système VLC	20
I.4.1 Emetteur VLC	20
I.4.2 Récepteur VLC	21
I.5 Standardisation	21
I.5.1 Couche Physique	24
1.5.1.1 Structure de la trame PHY	25
I.5.2 Couche MAC.....	25
I.5.2.1 Structure de la trame MAC.....	26
I.6 Topologies de réseau VLC	27
I.7 Les modulations dans le domaine des VLC	27
I.7.1 La modulation OOK.....	28
I.7.2 La modulation VPPM.....	29
I.7.3 La modulation CSK.....	29
I.7.4 La modulation OFDM	31
I.8 Avantages des communications VLC.....	31
I.9 Limites et challenges des communications VLC.....	33
I.10 Applications	35
I.11 Activités relatives aux communications VLC menées dans le monde	36
I.12 Conclusion	38
Chapitre 2 : La technologie Li-Fi	
II.1 Introduction	40
II.2 Généralités sur le Li-Fi.....	40

Table des matières

II.3 Genèse du Li-Fi	41
II.4 Architecture d'un réseau Li-Fi.....	42
II.5 Fonctionnement	43
II.6 Types de modulation d'un système Li-Fi.....	44
II.6.1 Modulation sur une seule porteuse (SCM).....	44
II.6.2. Modulation sur plusieurs porteuses (MCM)	45
II.7 Caractéristiques d'un réseau Li-Fi.....	47
II.7.1 Accès multiples	47
II.7.2 Duplex	48
II.7.3 L'attocell	49
II.7.4 Effet Handover	50
II.8 Standardisation	51
II.9 Différence entre le Li-Fi et le VLC	51
II.10 Le Li-Fi face au Wifi	52
II.11 Sécurité des couches PHY et MAC	54
II.12 Entreprises de commercialisation du Li-Fi	55
II.13 Conclusion.....	57

Chapitre 3 : Conception d'un système Li-Fi

III.1 Introduction	59
III.2 Mise en place	59
III.3 Présentation de l'environnement de travail	60
III.3.1 L'Arduino UNO.....	60
III.3.2 Les LEDs	63
III.3.3 Les photodétecteurs	64
III.3.3.1 Photorésistance :	64
III.3.3.2 Photodiode	65
III.3.3.2 Phototransistor	65

Table des matières

III.3.4 Les transistors	66
III.3.4.1 Transistor 2N2222	66
III.3.4.2 Transistor BD139.....	66
III.4 Montages de réalisation	67
III.4.1 Emission.....	67
III.4.2 Réception	68
III.5 Programmation	69
III.5.1 Codage	69
III.5.2 Modulation.....	69
III.5.3 Algorithme	70
III.6 Visualisation de la communication.....	71
III.7 Sécurisation de la transmission	73
III.7.1 Présentation de l'algorithme AES.....	74
III.7.1.2 Mode opératoire	75
III.7.1.3 Taille de bloc et bourrage	76
III.7.2 Implémentation de l'algorithme AES-CBC.....	76
III.7.2.1 Chiffrement (encryption)	76
III.7.2.2 Déchiffrement (decryption)	78
III.7.3 Codage Base64	79
III.8 Résultats de la transmission avec différents photodétecteurs	81
III.8.1 Variation de la distance.....	81
III.8.1.a Récepteur photorésistance.....	82
III.8.1.b Récepteur phototransistor	82
III.8.1.c Récepteur photodiode	82
III.8.2 Variation du débit	82
III.8.2.a Photorésistance.....	82
III.8.2.b Phototransistor	83

Table des matières

III.8.2.c Photodiode	84
III.9 Résultats finals	84
III.10 Conclusion	85
Conclusion générale	86
Bibliographie	88
Annexe	92

Introduction générale

Avec l'émergence de l'internet des objets (IoT, Internet of Things) et la croissance exponentielle des transferts de données sans fil, le spectre des fréquences radio (RF, Radio Frequency) est de plus en plus embouteillé.

Selon CISCO, le trafic mondial de données mobiles sera multiplié par sept entre 2017 et 2022. Le taux de croissance annuel moyen « CAGR » (Compound Annual Growth Rate) du trafic mobile augmentera de 46% entre 2017 et 2022, pour atteindre 77,5 Exaoctets par mois d'ici 2022, comme indiqué à la figure 1. [1]



Figure 1: Trafic global des données mobiles. [1]

L'augmentation des données mobiles, de jour en jour, aggrave la congestion du spectre radio. Le spectre RF, qui couvre la gamme 3kHz-300GHz du spectre électromagnétique, est fortement réglementé et utilisé pour de nombreuses applications tels que le WiFi, la 4G LTE ou encore les bandes occupées par la technologie LoRa. Dans le scénario actuel, comme le montre la figure 2, la capacité de bande passante disponible est limitée et insuffisamment capable de supporter la demande sans cesse croissante des données sans fil. Ceci est à l'origine de la notion du « crunch spectral ».

Le manque de fréquences est un risque dans les télécommunications et les réseaux sans fil, ce qui nécessite de profondes implications pour l'avenir.

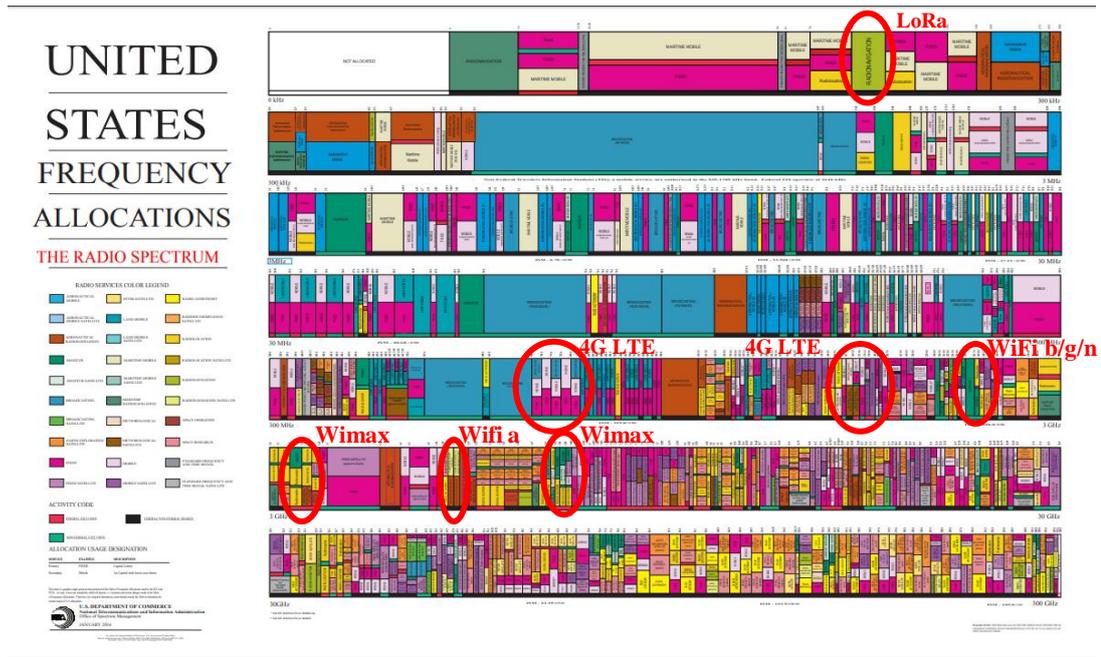


Figure 2 : Carte d'attribution des fréquences aux Etats-Unis. [2]

L'utilisation du spectre optique peut être une aide intéressante face à ce problème. Les communications par lumière visible (VLC, Visible Light Communication) sont sur le point de devenir une technologie convaincante pour compléter la communication par radiofréquence traditionnelle et permettre des nouveaux cas d'utilisation de périphérique sans fil. Ces communications utilisent le spectre visible et peuvent fournir des communications hertziennes au moyen d'éléments d'éclairage et d'affichage.

La gamme des fréquences utiles pour le VLC, dans le proche infrarouge et le visible, n'est pas régulée et dépasse en largeur de bande de loin la gamme RF.

Le Li-Fi, pour Light Fidelity, est le terme utilisé par certains pour désigner le système de communication VLC sans fil, rapide et bon marché, qui est la version optique du Wi-Fi. Le Li-Fi utilise la lumière visible au lieu des ondes radio Gigahertz pour le transfert de données.

Le Li-Fi peut jouer un rôle majeur dans le soulagement des lourdes charges auxquelles sont confrontés les systèmes sans fil actuels, car il ajoute une nouvelle bande passante inutilisée de la lumière visible aux ondes radio actuellement disponibles pour le transfert de données. Ainsi, il offre une bande de fréquence beaucoup plus large (300 THz) par rapport à celle disponible dans les communications RF (300 GHz).

Introduction générale

La technologie Li-Fi peut être la technologie du futur et un complément intéressant aux réseaux Wi-Fi. Les données seront transmises aux ordinateurs portables, aux smartphones, aux tablettes...etc. via une source de lumière à LED.

Hormis la faculté de soulagement du spectre RF, le Li-Fi résout de nombreux problèmes que doit faire face le Wi-Fi tels que la question de sécurité, du débit non suffisant, ou encore des problèmes liés aux ondes électromagnétiques dans les lieux sensibles. En outre, davantage de données traversant le spectre visible pourraient contribuer à atténuer les préoccupations selon lesquelles les ondes électromagnétiques fournies avec le Wi-Fi pourraient nuire à notre santé et interférer avec d'autres équipements.

L'objectif de ce travail est l'étude et la conception d'un système de communication Li-Fi fiable et efficace, capable d'émettre et de recevoir des messages cryptés en instantanés. La lumière visible est le support de transmission de ce système.

Plan du mémoire :

Ce mémoire est divisé en trois chapitres :

Premier chapitre : Ce chapitre introduit les communications par lumière visible. De l'origine de cette technologie à son développement, un bref historique est abordé. Dans ce chapitre, toutes les principales caractéristiques de ce type de communication, ses avantages et ses inconvénients, ainsi que son fonctionnement sont détaillés. Les différents types d'applications et de recherches autour de cette technologie appliquée au domaine du visible sont également illustrés.

Deuxième chapitre : Ce chapitre se focalise sur l'étude de la technologie Li-Fi. Fonctionnement, architecture, caractéristiques et principaux atouts face aux Wi-Fi, sont les points étudiés au cours de ce chapitre.

Troisième chapitre : Pour finir, ce dernier chapitre est consacré à la mise en pratique du sujet. C'est-à-dire, la conception d'un système de communication par lumière visible à l'aide de deux cartes électroniques Arduino, utilisées respectivement pour l'émission et la réception. La notion de sécurité est également abordée. Elle est nécessaire pour permettre de s'assurer qu'uniquement le destinataire légitime pourra avoir accès à la donnée.

Ce document se termine par une conclusion générale sur le travail effectué, ainsi que sur les diverses perspectives offertes par l'ensemble des résultats obtenus.

Chapitre 1 :

Introduction aux

communications par lumière

visible

Sommaire

I.1 Introduction

I.2 Généralités

I.3 Historique des communications par lumière visible

I.4 Architecture d'un système VLC

I.5 Standardisation

I.6 Topologie de réseau VLC

I.7 Les modulations dans le domaine des VLC

I.8 Avantages des communications VLC

I.9 Limites et challenges des communications VLC

I.10 Applications

I.11 Activités relatives aux communications VLC menées dans le monde

I.12 Conclusion

Chapitre 1

Introduction aux communications par lumière visible

I.1 Introduction

Le développement des dispositifs d'éclairage à l'état solide (SSL, Solid State Lighting), en particulier des diodes électroluminescentes (LED, Light Emitting Diode) ont connu une croissance considérable. A l'époque actuelle, les LEDs sont extrêmement fiables, efficaces et ont une durée de vie qui dépasse de loin les sources de lumière classiques. Suite à ces nombreux avantages, les LEDs ont commencé à être utilisées dans de plus en plus d'applications d'éclairage et il est considéré que, dans un proche avenir, elles remplaceront complètement les sources d'éclairage traditionnelles.

Outre ces caractéristiques remarquables, les LEDs sont capables de commuter rapidement, ce qui leur permet d'être utilisées non seulement pour l'éclairage mais aussi pour la communication. Cette fonctionnalité a donné naissance à une nouvelle technologie de communication, connue sous le nom de communication par lumière visible (VLC, Visible Light Communication), permettant d'utiliser des luminaires à LED pour le transfert de données à grande vitesse.

Dans ce chapitre, les généralités et les caractéristiques des communications par lumière visible sont présentées. Le principe de fonctionnement de cette technologie et l'architecture nécessaire à une telle communication sont également détaillés, suivi des domaines d'application possibles.

I.2 Généralités

La technologie VLC est un sous-ensemble des communications sans fil optique (OWC, Optical Wireless Communications). Les longueurs d'onde des communications OWC comprennent la lumière infrarouge, visible et ultraviolette, tandis que les communications VLC concernent uniquement la partie visible du spectre de longueurs d'onde comprises entre 380 et 750 nm [3], correspondant à un spectre de fréquences de 430 THz à 790 THz [4], comme illustré à la figure I.1.

La raison pour laquelle le VLC est devenue une technologie en soi tient du fait que sa lumière peut être vue par l'œil humain et peut donc fournir à la fois un éclairage et une communication, contrairement aux OWC qui ne peuvent fournir qu'une communication.

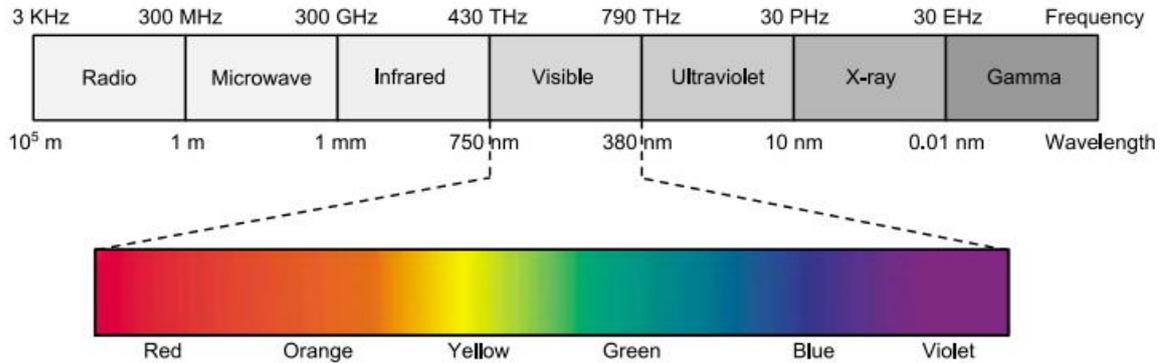


Figure I.1 : Spectre électromagnétique. [5]

Les systèmes VLC peuvent utiliser toute la gamme du spectre de la lumière visible. Le problème de la faible bande passante de la communication RF est résolu dans ces communications grâce à une grande disponibilité de la bande passante (plus de 10 000 fois supérieure à la largeur de bande du spectre RF). [6]

I.3 Historique des communications par lumière visible

Communiquer par optique fût l'un des premiers moyens de communication utilisé par l'être humain. On peut prendre pour exemple les signaux lumineux envoyés entre deux bateaux ou encore les signaux de fumées des peuples indiens d'Amérique. Très rudimentaires par leur aspect, ces techniques permettaient néanmoins de transmettre de manière rapide et efficace des informations essentielles.

Au début des années 1800, l'héliographe, un télégraphe solaire sans fil basé sur des éclairs réfléchis en code morse, a été mis au point par l'armée américaine. Ce dispositif permettait grâce à un miroir de renvoyer la lumière du soleil dans une direction pour communiquer en code morse. [4]

Ce n'est qu'en 1880, année de l'invention du photophone d'Alexander Graham Bell (figure I.2), que le premier véritable dispositif de communication par optique sans fil ait pu voir le jour. [7] Le photophone permettait de transmettre le son de la voix par communication lumineuse sans fil. Grâce à un miroir, la lumière du soleil est redirigée d'un point à un autre. Ce miroir est déformable. Les ondes sonores de la voix sont envoyées sur ce miroir, qui est

alors déformé. La lumière du soleil renvoyée par le miroir est donc modulée. Une parabole est utilisée en réception. Elle est couplée à un dispositif permettant de convertir l'information lumineuse en électricité puis d'amplifier le signal. Le signal sert ensuite à émettre le son vers l'utilisateur. Bien que le photophone soit resté au stade de prototype fonctionnel, cette invention est la première utilisation complexe de la communication sans fil par lumière visible. [8]

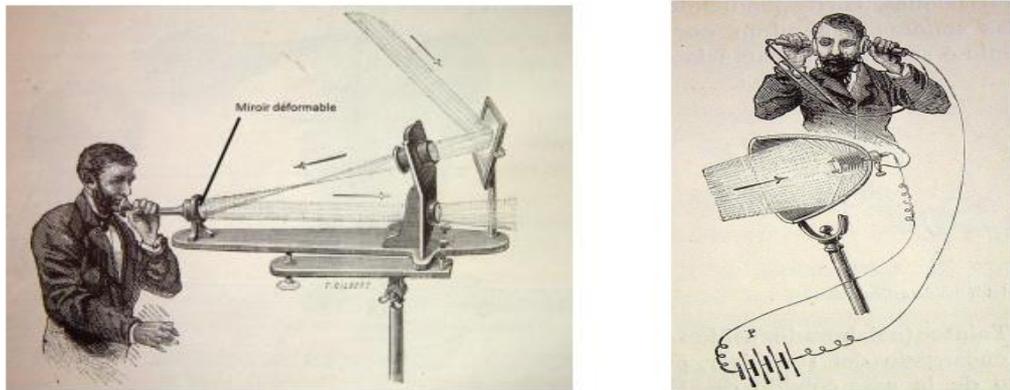


Figure I.2 : Dispositifs d'émission et de réception du photophone. [8]

Malgré des premiers résultats prometteurs, l'appareil fût très vite concurrencé par l'invention du télégraphe en 1894 par Guglielmo Marconi. Cette technologie permettait de couvrir de plus grandes distances. Le photophone fût par la suite délaissé au profit du développement d'appareils utilisant les radiofréquences (RF).

Il faut attendre les années 60 avec l'invention des premières diodes électroluminescentes LED, et des dispositifs laser pour voir ressurgir cette technologie. De nombreuses expérimentations se sont déroulées jusque vers les années 70 correspondant au développement des fibres optiques qui supplantent alors l'optique sans fil pour les transmissions longues distances. [7]

En 1979, F. R. Gfeller et G. Bapst ont démontré la faisabilité technique de la communication optique sans fil en intérieur, utilisant des LEDs à infrarouge.

À mesure que l'industrie de l'éclairage à LED progressait, la caractéristique de commutation rapide des LEDs à lumière visible incitait des recherches actives sur le VLC à haute vitesse. Un concept a d'abord été proposé par Pang et al. en 1999, en utilisant le feu tricolore LED comme émetteur de signal optique. Par la suite, S. Haruyama et M. Nakagawa ont mené une série d'études fondamentales à l'Université Keio au Japon. Ils ont étudié la possibilité de fournir un éclairage et une communication simultanés à l'aide de LEDs blanches

pour les systèmes VLC. Ils ont non seulement examiné et analysé les effets de la réflexion de la lumière et de l'ombrage sur les performances du système, mais ils ont également exploré les applications VLC à des vitesses relativement faibles. [9]

En 2004, les premières démonstrations de communication à haut débit à l'aide de diodes LEDs ont été effectuées au Japon au moyen de photodiodes. Grâce à la multiplication des téléphones cellulaires équipés de caméras, ces dispositifs ont pu être utilisés comme récepteurs VLC. Des chercheurs ont commencé à utiliser des écrans à affichage de cristaux liquides (LCD, Liquid Crystal Display) et d'autres éléments d'affichage en tant qu'émetteurs. Le Visible Light Communications Consortium (VLCC) du Japon a été l'un des premiers organismes de normalisation à mener des travaux sur une norme relative aux communications VLC. En 2008, cet organisme a élargi la portée de la norme élaborée par l'Association sur les données infrarouge (IrDA, Infrared Data Association) pour les communications infrarouges, de façon à y inclure le spectre de la lumière visible. [3]

I.4 Architecture d'un système VLC

Un système VLC est constitué principalement d'un émetteur qui module la lumière produite par les LEDs et d'un récepteur basé sur un photodétecteur, utilisé pour extraire le signal modulé de la lumière. L'émetteur et le récepteur sont séparés physiquement les uns des autres, mais sont connectés via le canal VLC [10] comme représenté sur la figure I.3.

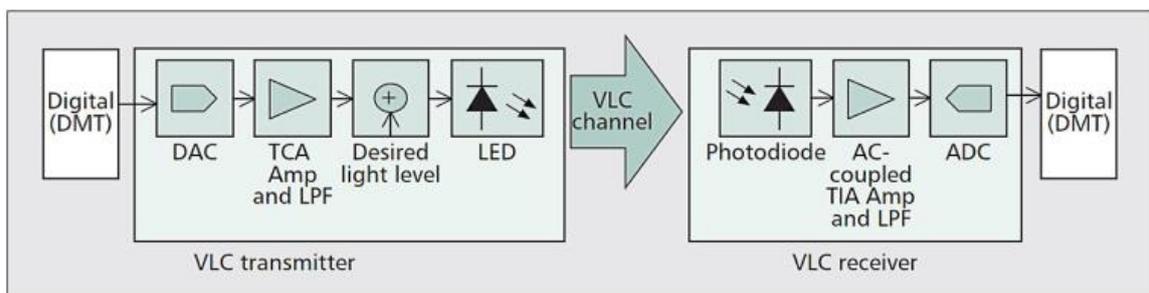


Figure I.3 : Schéma fonctionnel d'un système VLC. [11]

I.4.1 Emetteur VLC

Un émetteur VLC est un dispositif transducteur électro-optique qui transmet des informations en utilisant des ondes lumineuses visibles sur un support de transmission sans fil. [12] L'émetteur est constitué d'un convertisseur numérique-analogique (DAC, Digital to Analog Converter) qui prend en charge la modulation des bits de l'information et les convertit en un signal de courant analogique, d'un amplificateur à transconductance (TCA,

Transconductance Amplifier), de filtres passe-bas (LPF, Low Pass Filter) et de LEDs à haute vitesse. [13] La LED convertit un signal électrique en énergie optique fournissant à la fois un éclairage et une communication. Les informations sont codées en ligne et modulées par le DAC, puis transmises au signal optique en modulant l'amplitude ou une autre caractéristique de la lumière LED. [11]

I.4.2 Récepteur VLC

Au niveau du récepteur, la photodiode convertit la puissance optique reçue en un signal électrique, qui est ensuite amplifié, démodulé et décodé par un amplificateur transimpédance (TIA, Transimpedance Amplifier), suivi d'un filtre passe-bas LPF. Un convertisseur analogique-numérique (ADC, Analog to Digital Converter) est utilisé pour transformer le signal du courant analogique en un signal numérique afin de récupérer les bits du message de l'utilisateur.

Il existe de nombreux types de photodétecteurs, tels que *les photomultiplicateurs, les photoconducteurs, les phototransistors et les photodiodes*, chacun possédant des qualités spécifiques. Cependant, les photodiodes sont les dispositifs les plus appréciés en tant que photodétecteur en raison de leur petite taille, de leur grande sensibilité et de leur réponse rapide. Les diodes P-I-N (Positive Intrinsic Negative Diode) et les photodiodes APD (Avalanche Photodiode) sont les types favoris de photodiodes utilisées en tant que photodétecteur. [14]

I.5 Standardisation

Avec l'évolution rapide des technologies VLC, il a été impératif d'élaborer des normes pour standardiser les protocoles de la couche physique (PHY) et ceux de la couche de contrôle d'accès au médium (MAC, Media Access Control). De nombreux organismes nationaux de normalisation se sont intéressés à cette technologie considérée comme très prometteuse en raison du développement rapide de l'éclairage à semi-conducteurs.

La normalisation du VLC a été réalisée par le Consortium De Communication De Lumière Visible (VLCC) au Japon et par l'organisme IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Le VLCC a publié les normes JEITA (Japan Electronics and Information Technology Industries Association) CP-1221, JEITA Cp-1222 et JEITA Cp-1223. La norme 802.15.7 est la norme complétée par l'IEEE en 2011 pour les couches physique et MAC. [4]

La norme IEEE 802.15.7 fournit une référence minimale pour le développement de nouveaux produits. Les trois différentes classes d'appareils prises en compte par cette norme sont les véhicules, les mobiles et les infrastructures comme indiqué dans le tableau I.1.

En 2014, un nouveau groupe de travail 802.15.7r1 a été formé pour apporter des modifications à la norme précédente. La nouvelle norme, appelée IEEE 802.15.7r1, a été publiée en 2017. [15]

En 2018, une nouvelle norme IEEE 802.15.7m a été créée pour faire évoluer le premier standard en incluant les communications utilisant un capteur d'image ou caméra (OCC, Optical Camera Communication) et les communications faible débit unidirectionnelles utilisant des LEDs, tandis que la norme IEEE 802.15.13 a pris en charge le développement des communications OWC à haute vitesse (Multi-Gigabit/s Optical Wireless Communications).

Tableau I.1 : Classification des périphériques IEEE 802.15.7. [4]

	Infrastructure	Mobile	Véhicule
Coordinateur fixe	Oui	Non	Non
Source de courant	Ample	Limitée	Modérée
Facteur de forme	Non contraint	Contraint	Contraint
Source de lumière	Intense	Faible	Intense
Mobilité physique	Non	Oui	Oui
Intervalle	Court/Long	Court	Long
Débit de données	Elevé/Bas	Elevé	Bas

L'architecture IEEE 802.15.7, comme représentée sur la figure I.4, est définie par un nombre de couches et de sous-couches afin de simplifier le standard. Chaque couche est responsable d'une partie de la norme et offre des services aux couches supérieures. L'interface entre les différentes couches sert à définir des liens logiques. [16]

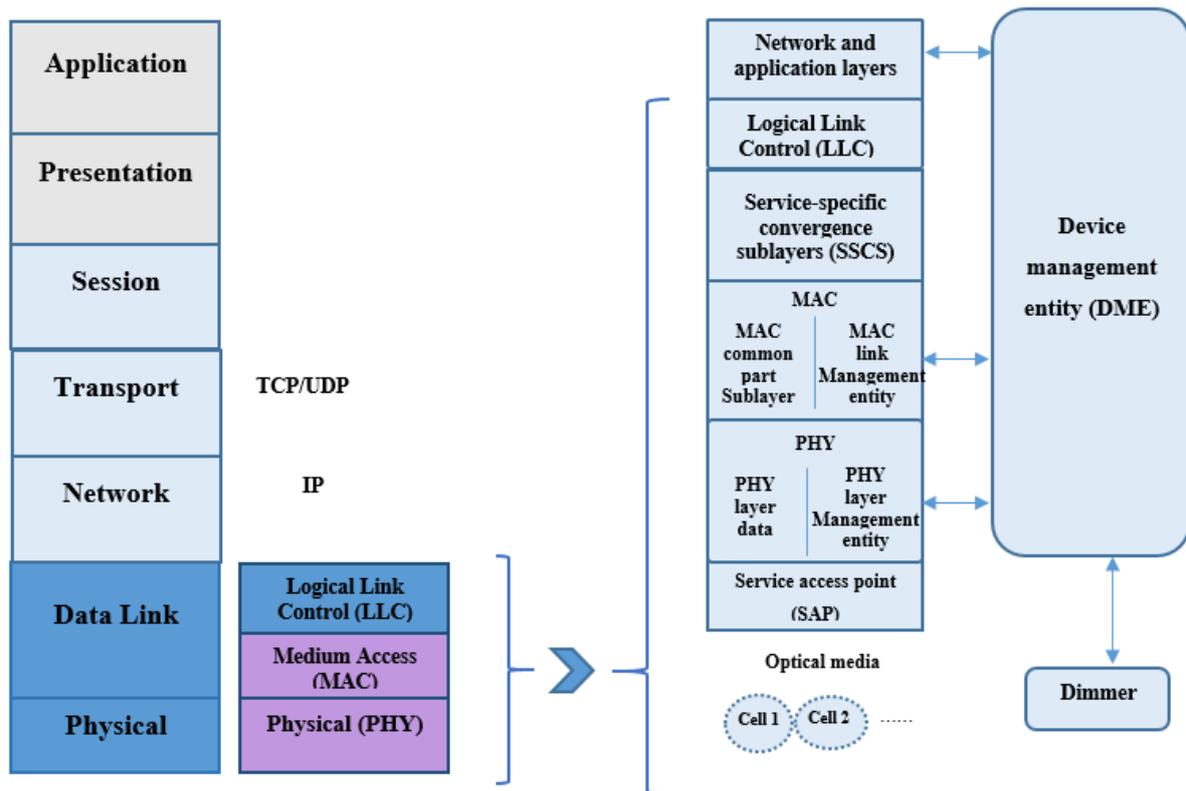


Figure I.4 : Architecture de périphérique VLC sous la norme IEEE 802.15.7.

Les couches supérieures (upper layers) sont constituées d'une couche réseau et d'une couche application. La définition de ces couches n'est pas prise en charge par la norme IEEE 802.15.7.

La couche LLC (Logical Link Control) peut accéder à la couche MAC par le biais de la sous-couche SSCS (Service-Specific Convergence Sub-layer). Une entité DME (Device Management Entity) est également prise en charge dans l'architecture et permet d'accéder à certains attributs associés au dimmer (gradateur) provenant du MLME (MAC Link Management Entity) et du PLME (PHY Layer Management Entity) afin de fournir des informations de gradation collectées à la couche MAC et PHY. Le DME peut également contrôler le commutateur PHY en utilisant le PLME pour la sélection des sources optiques et des photodétecteurs. Les détails du DME ne sont pas compris dans le domaine d'application de cette norme. Le commutateur PHY assure l'interface avec le point d'accès au service optique SAP (Service Access Point) et peut se connecter au support optique, qui peut être constitué d'un ou plusieurs émetteurs/récepteurs. [16-17]

I.5.1 Couche Physique

La couche PHY est responsable de la transmission, de la réception, de l'activation et de la désactivation de l'émetteur-récepteur optique. Cette couche est également responsable de la détection de l'état du canal de transmission, s'il est en état de repos ou occupé. Il y a 3 modes de fonctionnement dans la couche PHY. Ces différents modes sont présentés dans le tableau I.2.

Tableau I.2 : Modes de fonctionnement de la couche PHY. [18]

Mode de fonctionnement	Usage	Catégorie	Débit
PHY I	Outdoor	Faible	11.6 Kbps – 266.6 Kbps
PHY II	Indoor	Modéré	1.25 Mbps – 96 Mbps
PHY III	Émetteur- récepteur optique multiple	Modulation CSK	12 Mbps – 96 Mbps

Les trois types de PHY peuvent coexister mais ne peuvent pas inter-opérer. Les types PHY I et PHY II occupent différentes régions spectrales dans le spectre de modulation et coexistent en utilisant le multiplexage par répartition en fréquence (FDM, Frequency Division Multiplexing) (voir figure I.5). [10] Les mécanismes PHY I et PHY III occupent également différentes régions spectrales dans le spectre de modulation avec des débits de données différents et un support de débit optique différent assurant ainsi une coexistence entre eux.

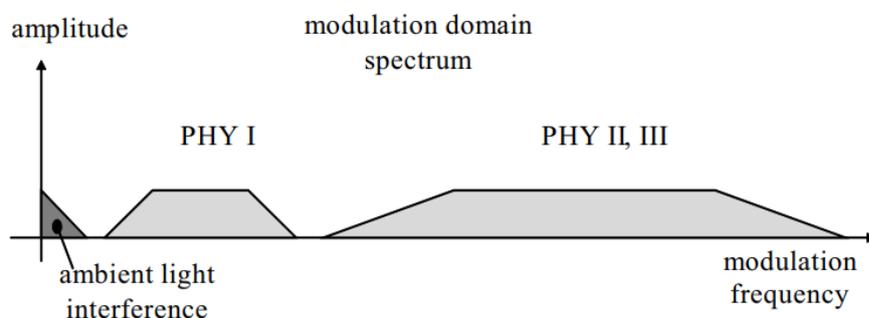


Figure I.5 : Multiplexage des types de PHY. [16]

Toutefois, les fréquences d'horloge optique utilisées pour PHY II et PHY III se chevauchent, ce qui entraîne un chevauchement important dans le spectre du domaine fréquentiel. De plus, tous les appareils ne prennent pas en charge plusieurs bandes de fréquence

optiques nécessaires pour PHY III. Par conséquent, tous les périphériques PHY III utilisent un périphérique PHY II pour la découverte de périphériques afin de prendre en charge la coexistence avec PHY II. [16]

1.5.1.1 Structure de la trame PHY

La structure de la trame PHY, comme illustrée à la figure I.6, est composée de trois parties principales : un en-tête de synchronisation SHR (Synchronization Header), un en-tête PHR (PHY header) et une unité de données de service PHY PSDU (PHY Service Data Unit). Les champs SHR, PHR et PSDU forment ensemble la trame PHY ou l'unité de données de couche PHY (PPDU, PHY Layer Data Unit). [16]

Preamble	PHY header	HCS (CRC)	Optional fields	PSDU
SHR	PHR			PHY payload

Figure I.6 : Format de la trame PHY.

- L'en-tête de synchronisation (SHR) est composé du préambule utilisé pour obtenir la synchronisation d'horloge.
- Le bloc PHR est composé d'un en-tête PHY, d'un champ HCS (Header Check Sequence) et de champs facultatifs. L'en-tête PHY contient des paramètres indiquant comment les données doivent être transmises, la partie HCS permet de vérifier les erreurs éventuelles et les champs facultatifs permettent de proportionner des informations plus spécifiques.
- Le bloc PHY Service Data Unit (PSDU) contient la charge utile de la trame. [19]

I.5.2 Couche MAC

La couche MAC a plusieurs rôles importants à réaliser :

- Gestion du mécanisme d'accès au support.
- Garantir l'intégrité des données.
- Supporte les associations et dissociations au réseau personnel de communication en lumière visible (VPAN, VLC Personal Area Network).
- Stabilisation de la couleur.
- Gestion des mécanismes de support d'éclairage et de gradation.
- Gestion des mécanismes de prise en charge de la mobilité.

- Fournir un lien fiable entre différentes entités MAC. [16-17]

La couche MAC fournit deux services aux couches supérieures : SAP (Service Access Point) :

- Service de données : MCPS-SAP (MAC Common Part Sublayer);
- Service de gestion : MLME-SAP (MAC Layer Management Entity).

La couche MAC reçoit deux services de la couche physique qui est la couche inférieure.

- Service de données : PD-SAP (PHY Data service);
- Service de gestion : PLME-SAP (PHY Layer Management Entity). [20]

La Figure I.7 propose une illustration des interactions des services proposés et reçus par la couche MAC.

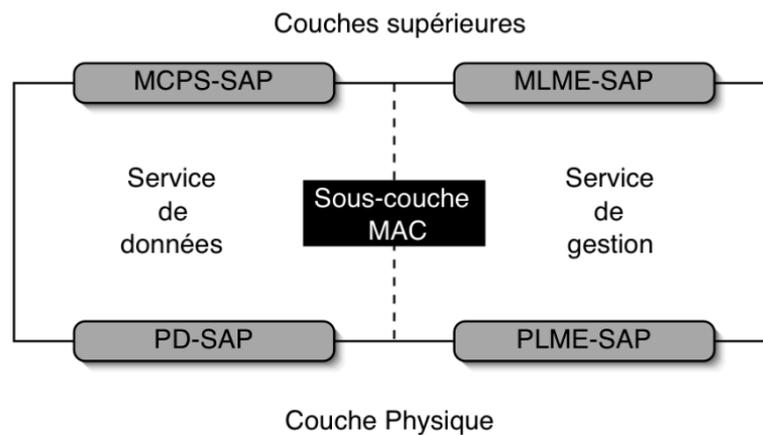


Figure I.7 : Interactions des services de la couche MAC. [20]

I.5.2.1 Structure de la trame MAC

Comme illustré à la figure I.8, chaque trame MAC comprend les composants de base suivants :

- un en-tête MAC (MHR, MAC Header) comprenant le contrôle de trame, le numéro de séquence, les informations d'adresse et les informations relatives à la sécurité.
- Une unité de données de service MAC (MSDU, MAC Service Data Unit) de longueur variable, qui contient des informations spécifiques au type de trame. Les trames d'accusé de réception ne contiennent pas de charge utile.
- Un champ MAC Footer (MFR) contenant une séquence de contrôle de trame (FCS, Frame Control Sequence). [21]

Frame Control	Sequence Number	Dest. VPAN Identifier	Addressing Fields	Auxiliary Security Header	Frame Payload	FCS
MHR					MSDU	MFR

Figure I.8 : Format de la trame MAC.

I.6 Topologies de réseau VLC

La norme IEEE 802.15.7 relative aux réseaux VPAN prend en charge trois topologies: pair à pair, étoile et mode diffusion (voir figure I.9).

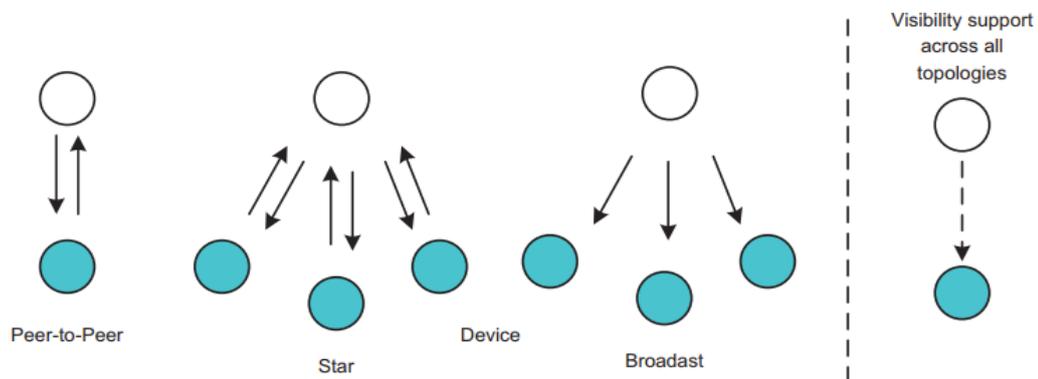


Figure I.9 : Topologies MAC prises en charge par IEEE 802.15.7. [4]

- **Topologie en pair-à-pair (peer to peer)** : Les échanges peuvent se faire directement entre deux dispositifs sans passer par un coordinateur réseau.
- **Topologie en étoile** : Les échanges de données passent par un coordinateur réseau.
- **Topologie en mode diffusion** : L'appareil en mode diffusion peut transmettre un signal à d'autres appareils sans former de réseau. La communication est unidirectionnelle et l'adresse de destination n'est pas obligatoire. [16]

I.7 Les modulations dans le domaine des VLC

Il existe plusieurs techniques de modulations associées aux communications par optique sans fil. Dans le cadre des VLC, la sélection d'une modulation en particulier se fait selon deux critères :

- **Besoin en éclairage** : Différentes activités nécessitent des éclairages différents, tels que 30–100 lux requis pour des activités visuelles normales dans des lieux publics. Il existe une relation non linéaire entre la lumière mesurée et la lumière perçue, leur relation est donnée par l'équation I.1 :

$$\text{Lumière perçue (\%)} = 100 \times \sqrt{\frac{\text{Lumière mesurée (\%)}}{100}} \quad (\text{I.1})$$

- **Adaptation à l'effet de scintillement** : Les changements de luminosité de la lumière modulée doivent être effectués de manière à ne pas entraîner de fluctuations perceptibles par l'homme. Selon l'IEEE 802.15.7, la commutation doit être effectuée à un taux plus rapide que 200 Hz pour éviter des effets nocifs. [4]

Dans le premier standard IEEE 802.15.7, différents types de modulations sont proposés : la modulation OOK (On-Off Keying), la modulation VPPM (Variable Pulse Position Modulation) et la modulation CSK (Color Shift Keying). Cependant, de nombreux travaux ont montré l'intérêt d'utiliser des modulations multi-porteuses telles que la modulation OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing).

Les trois premières modulations sont retrouvées dans la couche physique (PHY) de la norme IEEE 802.15.7. Les types PHY I et PHY II sont définis pour une source lumineuse unique et prennent en charge les technologies OOK et VPPM, tandis que le type PHY III utilise plusieurs sources optiques à plusieurs fréquences (couleurs) en utilisant la modulation CSK. Les trois systèmes peuvent coexister offrant une atténuation de scintillement et une prise en charge de la gradation et permettent un compromis entre les débits de données et les plages de gradation. [22]

I.7.1 La modulation OOK

Comme illustré à la figure I.10, l'OOK est une technique de modulation simple dans laquelle le «1» numérique est représenté par la présence du signal, correspondant à l'état «ON», tandis que la donnée «0» est représentée par un signal de valeur égale à zéro, ou l'état «OFF». Le «ON» et le «OFF» représentent deux niveaux d'amplitude distincts, nécessaires à la communication, et n'impliquent pas nécessairement que la source de lumière soit complètement éteinte. Pour OOK, la norme IEEE 802.15.7 mentionne l'utilisation du code de Manchester pour s'assurer que la période des impulsions positives est identique à celle des impulsions négatives, mais cela double également la bande passante requise pour la transmission

OOK.[23] Cinq débits différents sont utilisés, à savoir 11.67 kbit/s, 24.44 kbit/s, 48.89 kbit/s, 73.3 kbit/s et 100 kbit/s. [10]

Alternativement, pour des débits binaires plus élevés, on utilise un codage à longueur limitée (RLL, Run Length Limited) qui est plus efficace spectralement. La gradation est prise en charge en ajoutant une extension OOK qui ajuste la sortie agrégée au niveau correct. [24]

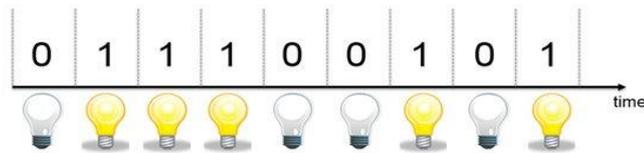


Figure I.10 : Schéma de modulation OOK. [25]

I.7.2 La modulation VPPM

La modulation VPPM est une variante de la Pulse Position Modulation (PPM), développée spécifiquement pour les VLC. En modulation PPM, l'information est représentée par la position de l'impulsion dans le temps. La variante VPPM introduit en plus la variation de largeur d'impulsion (PWM, Pulse Width Modulation), en fonction du niveau d'intensité lumineuse (voir figure I.11). Il s'agit d'une modulation Manchester OOK à laquelle on applique un rapport cyclique variable. La modulation VPPM permet de s'affranchir des problèmes de scintillement car on supprime les longues suites de symboles « 0 » et la technique PWM permet de contrôler l'intensité lumineuse. [7]

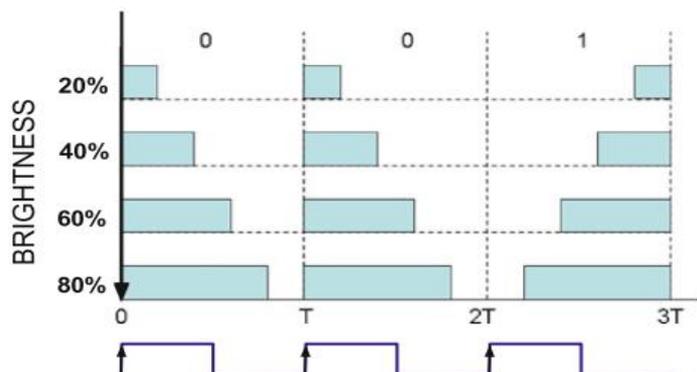
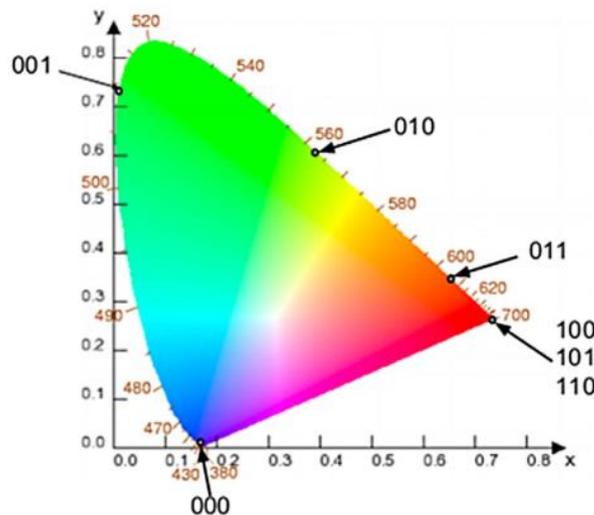


Figure I.11 : Modulation VPPM. [23]

I.7.3 La modulation CSK

A l'instar de la modulation VPPM, la modulation « Color-Shift Keying » est spécifique aux VLC. Elle a été proposée dans la norme IEEE 802.15.7 pour améliorer le débit de données

qui était faible dans d'autres types de modulation. La capacité de commutation ralentit en produisant une lumière blanche à l'aide de phosphore jaune et de LEDs bleues. Par conséquent, une autre façon de produire la lumière blanche consiste à utiliser trois LEDs distinctes, le vert, le bleu et le rouge. Elle est spécialement définie en utilisant l'intensité des trois couleurs d'une source LED RGB (Red Green Blue). La modulation CSK dépend du diagramme de chromaticité de l'espace colorimétrique. Contrairement aux autres modulations, les symboles sont ici sélectionnés de manière à ce que l'émission lumineuse reste constante alors que les différentes composantes chromatiques associées à chaque couleur varient. Cette modulation mappe toutes les couleurs perceptibles à l'œil sur deux paramètres de chromaticité tels que x et y . La figure I.12 illustre les sept bandes de longueur d'onde visibles par l'œil présentées dans un tableau avec leurs centres représentés sur le diagramme. [4-7]



Band (nm)	Code	Center (nm)	(x, y)
380–478	000	429	(0.169, 0.007)
478–540	001	509	(0.011, 0.733)
540–588	010	564	(0.402, 0.597)
588–633	011	611	(0.669, 0.331)
633–679	100	656	(0.729, 0.271)
679–726	101	703	(0.734, 0.265)
726–780	110	753	(0.734, 0.265)

Figure I.12 : Modulation CSK. [4]

Cette technique permet de s'affranchir complètement des problèmes de scintillement. De plus, comme le flux lumineux émis est constant, le courant de commande reste constant lui aussi, diminuant ainsi grandement les contraintes sur les sources. La limitation de cette

modulation est liée à la complexité et à la nécessité en réception d'être capable de recevoir chaque couleur. [7]

I.7.4 La modulation OFDM

Pour les applications hauts débits, on se retrouve rapidement confronté aux problèmes de limitation de la bande passante des sources ainsi que de génération de l'IES (Interférence entre symboles). Afin de répondre au mieux à ces problématiques, on peut utiliser une modulation de type OFDM.

Le principe de cette modulation est de considérer que les données sont envoyées sur plusieurs canaux en parallèle en utilisant différentes sous porteuses. Ainsi, le temps de chaque symbole correspondant à chaque sous porteuse est bien plus grand que son équivalent pour une porteuse unique, réduisant ainsi grandement l'impact de l'IES tout en permettant d'optimiser la bande passante.

L'utilisation d'un intervalle de garde permet également d'éliminer l'interférence entre sous-porteuses. Le principal avantage est alors de pouvoir réaliser une égalisation très simple en réception. De plus, il est possible de maximiser les performances en définissant différents débits et puissances transmises pour chaque sous porteuse.

Dans le cas d'un système IM/DD (Intensity-Modulated/Direct-Detected), les signaux portant l'information doivent être des réels positifs. Il s'agit de la différence majeure entre l'OFDM pour l'optique et pour les RF.

Différentes techniques ont été proposées pour adapter l'OFDM à un canal IM/DD. On peut citer en particulier la modulation DCO-OFDM (Direct Current biased Optical-OFDM) ou la modulation ACO-OFDM (Asymmetrically Clipped Optical-OFDM).

Malgré les nombreux avantages, la mise en œuvre de cette modulation est complexe, augmentant ainsi le prix des systèmes utilisant cette méthode. [7]

I.8 Avantages des communications VLC

Comparées aux technologies RF, les communications par lumière visible présentent de nombreuses caractéristiques très avantageuses, comme expliquées dans [7] et [9].

- **Large bande passante :** Le spectre des ondes radio est limité, de 3 kHz à 300 GHz, alors que le spectre de la lumière visible est d'au moins 10000 fois plus grand, qui est

de 430 THz à 790 THz. Contrairement aux RF, elle s'étend sur plusieurs THz et peut être utilisée sans restriction. Cet avantage permet de répondre au problème croissant de la congestion du spectre RF, limitant de plus en plus le déploiement de nouveaux appareils et réseaux de communications.

- **Pas d'interférence électromagnétique** : L'utilisation d'ondes lumineuses ne cause aucune perturbation électromagnétique. Les systèmes VLC conviennent aux communications dans les environnements d'immunité aux interférences électromagnétiques (EMI, Electromagnetic Interference), tels que les hôpitaux, les centrales nucléaires, et les avions.
- **Sécurisé** : Étant donné que les rayons lumineux ne traversent pas la matière et ne peuvent pénétrer dans les objets opaques, ils sont donc généralement confinés dans leur environnement. L'interception des données est ainsi impossible de l'extérieur. C'est un avantage qui permet d'améliorer la sécurité de l'information et d'assurer des liaisons de communications plus sûres.
- **Absence de risques pour la santé** : Étant donné que l'éclairage des LEDs ne génère pas de rayonnement, contrairement aux dispositifs à fréquence radio ou à micro-ondes, aucun risque évident n'est encouru pour l'environnement et la santé des utilisateurs.
- **Mise en œuvre facile et bas coût** : La mise en œuvre d'un système VLC est relativement simple. Au lieu de concevoir un système de communication sans fil complet, cette technologie permet de combiner les fonctions d'éclairage et de communication, seul quelques modules supplémentaires sont ajoutés au système d'éclairage. Ainsi, les besoins en termes d'installation et de maintenance sont réduits. Grâce au développement rapide de l'industrie des LEDs, le coût de la production massive d'émetteurs-récepteurs VLC ne cesse de diminuer.
- **Economique et écologique** : Les systèmes VLC peuvent réduire la consommation d'énergie car ils utilisent les éclairages à LED reconnus comme dispositifs d'éclairage écologique capables de réduire de 80% cette consommation par rapport à celle des sources d'éclairage traditionnelles. Si toutes les sources d'éclairage sont remplacées par des LEDs, la consommation mondiale d'électricité devrait être réduite de 50%. Selon un rapport récent du département américain de l'énergie, il est possible d'économiser jusqu'à 207 Téra Watt Heures (TWh) d'ici à 2025 grâce à l'adoption de la technologie d'éclairage à LED.

I.9 Limites et challenges des communications VLC

Malgré ses avantages intrinsèques par rapport aux autres systèmes de communication, VLC doit encore faire face à de nombreux défis qu'il faut résoudre. VLC est en phase de développement et, pour une éventuelle adoption commerciale, plusieurs problèmes ou limitations nécessitent une attention particulière.

Bande passante de modulation : L'un des principaux défis des communications VLC est la faible bande passante de modulation disponible pour les LEDs, qui est généralement de plusieurs mégahertz. Cette faible bande passante limite le débit de données réalisable. Il existe plusieurs méthodes pour améliorer la bande passante disponible pour les communications à l'aide de LED à lumière blanche, notamment le filtrage bleu, dans lequel le composant luminescent jaune du récepteur est bloqué à l'aide d'un filtre bleu, ce qui améliore la bande passante de modulation jusqu'à 20 MHz.

Interférence et bruit : D'autres sources de lumière artificielles et naturelles, telles que les lampes fluorescentes, à incandescence et solaires, créent un bruit de fond et des interférences car elles partagent la même bande de longueur d'onde que la transmission VLC. Il faut supprimer ces interférences dans la bande pour augmenter le rapport signal sur bruit parasite (SINR, Signal-to-Interference-plus-Noise) au niveau du récepteur. Les filtres optiques sont une méthode simple pour éliminer la grande majorité des interférences de source naturelle et artificielle. Combinés à un filtrage analogique et numérique supplémentaire après le photodétecteur, ils permettent de garantir que les interférences restantes soient négligeables. Le codage Manchester a fait preuve de sa résistance aux éclairages fluorescents à basse fréquence et a permis la réduction des bruits de fond optiques générés par les LEDs fonctionnant à des basses fréquences inférieures à 500 KHz. [22]

Non linéarité : Le défi majeur de la communication par la lumière visible est la non-linéarité des LEDs. La relation entre un flux d'électrons et la lumière émise par les LEDs n'est pas linéaire. Cela influe sur la configuration de la communication en lumière visible basée sur le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) qui inclut un rapport crête/moyenne plus élevé et provoque une augmentation du taux d'erreur (BER, Bit Error Rate) et des interférences entre porteuses (ICI). Afin de contrôler la non-linéarité des LEDs, il est nécessaire de rechercher un point de fonctionnement en courant continu optimal et une puissance de signal OFDM optimale pour moduler l'intensité de la LED. La dégradation de la

mémoire OFDM peut être grandement atténuée en utilisant les techniques de pré-distorsion et de post-distorsion pour contrecarrer l'effet des non-linéarités. [26]

Canaux de liaison montante (uplink) : VLC peut être utilisé pour la transmission de données par voie descendante (downlink) mais pas pour la voie montante (uplink). La tâche fondamentale de l'illumination rend VLC naturellement adapté aux applications de diffusion mais la fourniture d'une liaison montante adaptée aux structures d'émetteur a posé problème. La lumière visible ne convient pas pour la liaison montante, sinon le récepteur devra également être muni d'une LED en état de marche pour demander la donnée, ce qui n'est pas vraiment le but recherché. Néanmoins, pour des raisons de coût et de bande passante élevée, VLC peut être mis en œuvre pour fournir une liaison descendante non encombrée de grande capacité, tandis que le Wi-Fi ou l'IR peuvent fournir une liaison montante fiable, là où la congestion est moins probable. Plusieurs approches de liaison montante ont été proposées, y compris les émetteurs-récepteurs IR (Infrarouge), proche UV (Ultraviolet), RF et rétro réfléchissants, mais des études supplémentaires doivent être menées pour rechercher d'autres solutions et comparer les performances de toutes ces options.

Niveaux d'illumination : Etant donné que les communications VLC sont basées sur une source d'éclairage, il est important de minimiser la dégradation des performances de transmission des informations lorsque le niveau d'éclairage change pour ainsi pouvoir communiquer même dans les situations où la lumière est généralement éteinte. Lorsque des lieux sont occupés, les lumières sont généralement allumées à des fins d'éclairage, ce qui permet aux communications VLC de se dérouler sans frais d'énergie. Mais dans les conditions où les lumières ont tendance à être éteintes, le VLC ne peut pas avoir lieu. C'est pour cela qu'il est nécessaire que les lumières soient allumées mais avec une luminosité atténuée pour fournir la puissance nécessaire à la transmission VLC sans que l'éclairage soit remarqué. En général, il est nécessaire d'ajuster la luminosité des LEDs à mesure que le temps change tout en maintenant la transmission avec des performances acceptables. Cela exige le contrôle des puissances des LEDs, le contrôle des fonctions de transmission de données et le contrôle de gradation.

Ligne de vue : Le lien LoS (Line of Sight) correspond au trajet qui relie directement l'émetteur au récepteur. Dans une communication VLC, les récepteurs sont censés avoir une ligne de vue claire avec le système d'éclairage, ce qui constitue un certain avantage car le signal sera plus puissant. Les signaux lumineux visibles peuvent être réfléchis mais ne pénètrent pas dans la plupart des objets, ce qui peut constituer un désavantage en terme de couverture. Un

nombre de sources lumineuses doit être distribué pour maintenir un rapport signal sur bruit élevé. Si les niveaux de lumière sont faibles et que les récepteurs VLC n'ont pas de lien LoS, la communication est fortement limitée et le débit binaire est donc réduit. Le blocage de la ligne de vue est connu sous le nom de shadowing. Une modulation adaptative et un codage permettant de s'adapter en fonction des changements de canal peuvent être effectués pour empêcher les phénomènes de blocages.

Mobilité : La mobilité des utilisateurs est un point essentiel. Si le récepteur ou l'émetteur est mobile, la liaison peut être perdue en raison du mouvement ou de la rotation du terminal. Par conséquent, il est nécessaire et important de disposer de techniques de récupération de lien, de techniques d'adaptation de débit et de mécanismes de transfert pour maintenir le bon fonctionnement de la communication.

Distorsion par trajets multiples : Lorsque les émetteurs-récepteurs sont équipés d'un large faisceau, les copies du même signal provenant de plusieurs chemins arrivent à la destination avec des retards différents, car chaque chemin a une distance différente de la source à la destination. Cela crée une distorsion par trajets multiples pouvant entraîner des interférences entre symboles qui dégradent gravement la performance de la communication. [22]

I.10 Applications

La technologie VLC est encore en phase d'introduction et des efforts importants sont nécessaires avant de pouvoir être largement déployée pour des applications pratiques. Néanmoins, un certain nombre d'applications basées sur les LEDs a été déployé ou va l'être d'ici quelques années dans de nombreux secteurs.

Comme représenté dans [10] et [23], voici quelques une de ses applications :

- **Aviation :** Les passagers ne peuvent utiliser les ondes radio. Les éclairages à base de LED sont déjà utilisés dans les cabines d'aéronefs et chacun de ces éclairages pourrait être un potentiel émetteur VLC pour fournir à la fois des services d'éclairage et des services multimédias aux passagers. De plus, cela réduira les coûts de construction de l'avion et son poids.
- **Éclairage intelligent :** Les bâtiments intelligents nécessitent un éclairage esthétique. L'éclairage intelligent avec VLC fournit l'infrastructure nécessaire à la fois pour l'éclairage et la communication et réduit les circuits et la consommation d'énergie au sein d'un édifice.

- **Hôpitaux** : Dans les hôpitaux, certains équipements sont susceptibles d'interférer avec les ondes radio. L'utilisation du VLC présente de nombreux avantages dans ce domaine.
- **Communications sous-marines** : VLC peut prendre en charge des débits de données élevés sous l'eau, là où d'autres technologies sans fil comme les RF ne fonctionnent pas. Ainsi, les communications entre les plongeurs ou les véhicules télécommandés sont possibles.
- **Véhicule et transport** : Les feux de circulation et de nombreuses voitures utilisent des lumières à LED. Les voitures peuvent communiquer entre elles pour prévenir de quelconque accident et les feux de circulation peuvent également communiquer avec les voitures pour assurer la sécurité routière.
- **Environnements dangereux** : Dans des environnements tels que les usines pétrochimiques, les mines,...etc., les radiofréquences sont potentiellement dangereuses car il existe des risques d'explosion, ce qui rend la communication difficile. VLC peut être utilisée dans ce domaine, car il s'agit d'une technologie sûre qui fournit à la fois un éclairage et une communication.
- **Localisation** : Les personnes pourraient tirer parti des LEDs à distribution dense pour les références de localisation et utiliser des algorithmes de triangulation pour prévoir la position des périphériques. Il en résulte que le positionnement et la navigation à l'intérieur deviennent très précis grâce aux LEDs, comme le GPS (Global Positioning System) pour les satellites en extérieur. Les LEDs pourraient également envoyer des signaux de commande à un robot intelligent et guider son mouvement précis le long d'un itinéraire pour atteindre sa destination prédéfinie.
- **Li-Fi** : Le Li-Fi est un système de communication sans fil à lumière visible bidirectionnel à haute vitesse entièrement connecté. Il est analogue au Wi-Fi qui utilise la fréquence radio pour la communication. Un Li-Fi prête aussi soutien à l'Internet des objets (IoT). Une vitesse allant jusqu'à 10 Gbits/s peut être obtenue en utilisant le Li-Fi, qui est 250 fois plus grande que la vitesse du très haut débit. Cette technologie est expliquée plus en détail au cours du chapitre suivant.

I.11 Activités relatives aux communications VLC menées dans le monde

Les avantages potentiels de la technologie VLC ont convaincu des groupes de recherche de différentes régions du monde de s'efforcer de développer cette technologie. Cependant, durant les premières années, la recherche VLC était principalement prise en compte dans les

pays asiatiques. Comme l'énorme potentiel du VLC a commencé à être révélé, des laboratoires de recherche européens et américains ont commencé à travailler dans ce domaine et à ajouter des contributions significatives aux progrès du VLC. [10] La section suivante présente certaines des orientations de recherche VLC les plus représentatives :

En Chine : Huawei, China Telecom, Sanan Optoelectronics, Shenzhen Absen, Unilumin et Cnlight figurent au nombre des entreprises chinoises spécialisées dans la mise au point de produits basés sur les communications VLC.

Au Japon : Le laboratoire Nakagawa de l'Université Keio, Panasonic Corporation, CASIO, NEC et FUJI Electric figurent au nombre des institutions/entreprises qui mènent des travaux de recherche ou conçoivent des produits sur les communications VLC au Japon.

En Corée : L'Université nationale des sciences et des technologies de Seoul, l'Université Kookmin, l'Université Kongju, l'Université Namseoul, Samsung, LG et ETRI comptent parmi les institutions/entreprises qui mènent des travaux de recherche ou conçoivent des produits sur les communications VLC en Corée du Sud.

Au Pays-Bas : L'Université de technologie d'Eindhoven, le groupe des communications électro-optiques et Signify (connu aujourd'hui sous le nom de Philips Lighting), KPN et KIEN participent également à des projets relatifs aux communications VLC.

En Turquie : Les principales institutions menant des travaux de recherche sur les communications VLC sont Tubitak Bilgem, Okatem, l'Université Ozyegin et l'Université Medipol d'Istanbul. Ford Otosan, Farba, Aselsan et Turk Telekom participent également à des projets relatifs aux communications VLC.

En France : L'université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines, la start-up Lucibel, la start-up Oledcomm, la start-up Luciom pour la localisation en intérieur participent également au développement des technologies VLC.

En Allemagne : L'Université de Brême et l'institut Fraunhofer pour les télécommunications de l'Institut Heinrich Hertz (IHH) sont l'un des groupes de recherche les plus importants du VLC. Le travail de l'IHH était axé sur le développement de systèmes VLC à haut débit.

En Angleterre : Y figurent spécialement l'Université d'Oxford pour le développement de systèmes VLC à haut débit. en utilisant des systèmes MIMO, l'université de Northumbria

groupe de recherche sur l'utilisation de LEDs organiques (OLED) pour le traitement VLC et la start-up PureLiFi pour la mise sur le marché des technologies de communication par lumière visible.

Aux Etats-Unis d'Amérique : La startup Basic6, le centre de recherche en génie de l'éclairage intelligent de l'Université de Boston, la société LVX system se sont particulièrement intéressés à toutes les formes de système VLC. [3] [10]

I.12 Conclusion

Ce chapitre présente les principes de base des communications par lumière visible et l'architecture d'un tel système. Les avantages de cette technologie ont également été identifiés. Toutes ses caractéristiques avantageuses conduisent à considérer que la technologie de communication par lumière visible constitue un complément, voire dans certaines situations une alternative prometteuse aux systèmes de communications traditionnels par RF.

Cependant, comme toute technologie, le VLC rencontre à son tour des contraintes et des limites. Les principaux points faibles du VLC ont été détaillés au cours de ce chapitre. Les technologies de communication par lumière visible, actuellement en développement peuvent palier à certains de ses défauts, et même créer de nouvelles opportunités.

Les bases technologiques utilisées par ces nouveaux moyens de communication, comme la LED, arrivent à maturation. Cela permettra donc de bonnes performances techniques et énergétiques ainsi qu'un coût de déploiement contenu. De nombreuses applications sont possibles : de la communication entre ordinateur à la géolocalisation, de la communication entre voitures en passant par le Li-Fi. Le Li-Fi est la technologie qui est abordée au cours du chapitre suivant.

Chapitre 2 :

La technologie Li-Fi

Sommaire

- II.1 Introduction
- II.2 Généralités sur le Li-Fi
- II.3 Genèse du Li-Fi
- II.4 Architecture d'un réseau Li-Fi
- II.5 Fonctionnement
- II.6 Types de modulation d'un système Li-Fi
- II.7 Caractéristiques d'un réseau Li-Fi
- II.8 Standardisation
- II.9 Différence entre le Li-Fi et le VLC
- II.10 Le Li-Fi face au Wifi
- II.11 Sécurité d'une communication Li-Fi
- II.12 Entreprises de commercialisation du Li-Fi
- II.13 Conclusion

Chapitre 2 :

La technologie Li-Fi

II.1 Introduction

La technologie Li-Fi, connue sous le nom de «Light Fidelity», est un acteur majeur de l'internet de demain. C'est un système de communication sans fil dans lequel la lumière est utilisée comme signal porteur au lieu de la fréquence radio traditionnelle comme dans le Wi-Fi. En utilisant des diodes électroluminescentes pour transmettre des données sans fil, le Li-Fi est une application des communications par lumière visible. L'idéologie de base de cette technologie est que les données peuvent être transmises via la lumière, dont l'intensité varie encore plus rapidement que celle de l'œil humain. Le terme a été inventé par le professeur **Harald Haas** et appartient à la catégorie des communications optiques sans fil. Cette technologie pourrait être un complément à la communication RF (réseau Wi-Fi ou cellulaire), voire même un remplacement dans des contextes de diffusion de données. Jusqu'ici, le Li-Fi est environ 100 fois plus rapide que certaines applications Wi-Fi, atteignant des vitesses de 224 gigabits par seconde.

Ce chapitre détaille les principales caractéristiques de la technologie Li-Fi, son origine, son principe de fonctionnement et ses atouts face au Wi-Fi.

II.2 Généralités sur le Li-Fi

Le Li-Fi est une technologie de communication sans fil, bidirectionnelle, à haut débit, qui utilise la partie visible du spectre électromagnétique. Tout comme le Wi-Fi, le Li-Fi permet par exemple à un appareil de se connecter à internet et implique donc un transfert de données. La différence entre ces deux technologies réside dans la façon de transmettre ses données. En effet, le Wi-Fi relie des appareils informatiques au sein d'un réseau par le biais d'ondes radios, contrairement au Li-Fi, qui, comme dit précédemment, remplit la même fonction à l'aide de la lumière visible : les données à transmettre sont codées sous forme de signal électrique et ensuite transmises en signal lumineux grâce à un circuit constitué d'une ou de plusieurs sources de lumières (par signal lumineux, on entend des variations de l'intensité lumineuse des sources ; dans le cas du Li-Fi, ces variations sont si rapides qu'elles en deviennent imperceptibles). Différentes intensités de lumière des sources sont possibles en fonction des données à transmettre. Les variations de luminosité pourront alors être captées par les appareils concernés,

seront retransformées en signal électrique et décodées pour récupérer les données, pour autant que ces appareils receveurs soient munis d'un récepteur de lumière. Le système Li-Fi pourrait donc être assuré par les éclairages LED. [27]

II.3 Genèse du Li-Fi

Harald Haas, professeur à l'Université d'Édimbourg au Royaume-Uni et co-fondateur de la start-up PureLiFi, est largement reconnu comme le fondateur du Li-Fi.

Il a présenté pour la première fois ce qu'il a appelé un prototype Li-Fi lors de la conférence TED Global à Édimbourg le 12 juillet 2011. Il a démontré un taux de transmission de données d'environ 10 Mbps (Mégabits par seconde), comparable à une assez bonne connexion haut débit au Royaume-Uni. Deux mois plus tard, il atteignait 123 Mbps. [28]

En 2011, des scientifiques allemands ont réussi à créer un réseau sans fil capable de traiter 800 Mbps en n'utilisant rien de plus que des ampoules LED rouges, bleues, vertes et blanches.

En août 2013, des débits de données supérieurs à 1,6 Gbit/s avaient été démontrés sur une LED à couleur unique. En octobre 2013, il a été signalé que les fabricants chinois travaillaient sur des kits de développement Li-Fi.

En janvier 2014, le premier smartphone équipé Li-Fi est présenté au CES à Las Vegas par la société Française SunPartner. En avril 2014, la société russe Stins Coman a annoncé le développement d'un réseau sans fil Li-Fi, réseau local appelé Beam Caster. Leur module actuel transfère des données à 1,25 gigaoctet par seconde mais prévoit d'augmenter la vitesse jusqu'à 5 Go/seconde. [29]

Fin 2015, une multiplication de sites pilotes notamment en France et en Europe a vu le jour. L'hôpital de Perpignan est le premier établissement de santé à avoir testé le Li-Fi dans un service d'urgences. Le réseau permet l'accès aux dossiers des patients.

En 2016, on parle de système bidirectionnel. Un prototype de luminaire bidirectionnel et haut débit Li-Fi, développé par la société française Lucibel, a été testé au siège du constructeur immobilier Sogreprom en France. [30]

En 2018, Oledcomm, une startup française, a présenté la MyLiFi une lampe de bureau LED qui diffuse une connexion Internet sans fil via la lumière en utilisant la technologie Li-Fi.

En 2019, au salon high-tech à Las Vegas, Oledcomm est de retour avec un autre produit baptisé LiFiMax, offrant un débit de 100 Mbit/s en débit descendant et 40 Mbit/s en flux montant.

II.4 Architecture d'un réseau Li-Fi

La conception Li-Fi est composée d'un grand nombre d'éclairages à LED utilisé pour la transmission optique en appliquant une tension constante et un courant constant. Comme expliqué dans [31], les composants fondamentaux d'un tel système sont :

- Plusieurs éclairages à LED pour la transmission de données.
- Un capteur de lumière pour la réception de données. Cela peut se faire par un photodétecteur ou soit par une caméra, par exemple la caméra d'un téléphone mobile. Dans ce dernier cas, on parle de « Optical Camera Communication » (OCC).

Comme illustré à la figure II.1, les terminaux peuvent se connecter à Internet via une lampe à LED. Le driver (pilote à lampe) permet de contrôler la luminosité des LEDs selon l'environnement et les données reçues.

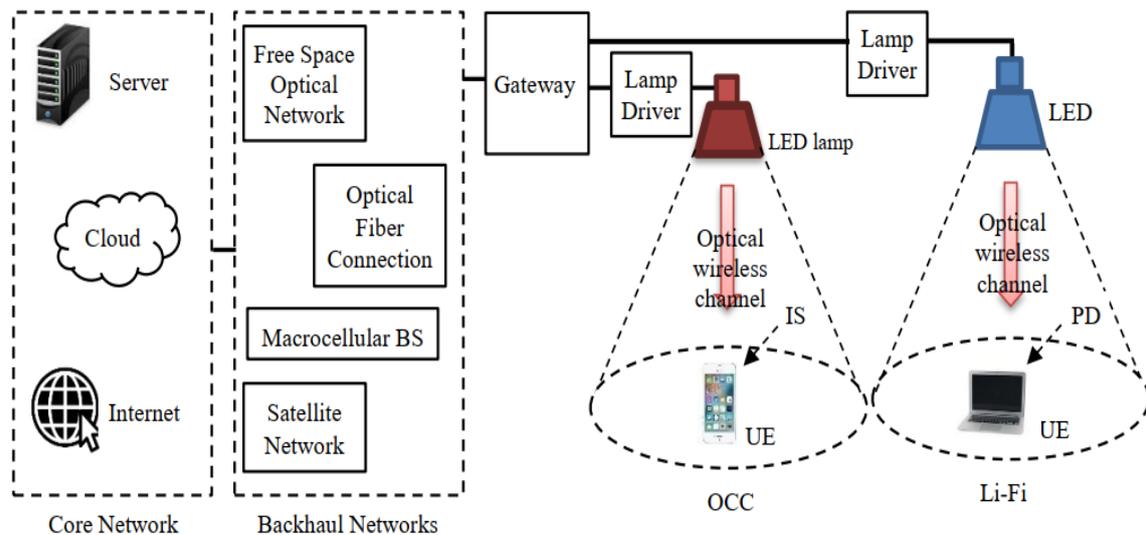


Figure II.1 : Architecture d'un système Li-Fi. [32]

II.5 Fonctionnement

Le fonctionnement du Li-Fi est très simple. Il y a un émetteur de lumière à une extrémité, par exemple une LED, et un photodétecteur (capteur de lumière) de l'autre. Le photodétecteur enregistre un «1» binaire lorsque le voyant est allumé et un «0» binaire si le voyant est éteint. En faisant allumer et éteindre la lumière de façon très rapide (en l'espace de quelques nanosecondes) et invisible à l'œil nu, une fréquence est générée permettant de transporter l'information. Le Li-Fi peut s'intégrer dans le réseau internet en remplacement des points d'accès WiFi. Grâce à son intégration dans les lampes LED, les ordinateurs disposant de dispositifs émetteurs/récepteurs comme des clés USB pourront se connecter au réseau Li-Fi dans un rayon de 10 à 15 m.

Comme illustré à la figure II.2 et expliqué dans [33], l'établissement d'un réseau Li-Fi passe par différentes étapes :

- **Envoi des informations numériques dans le réseau électrique :** L'ordinateur est branché au réseau électrique par un adaptateur CPL (Courant Porteur en Ligne). Ce dernier permet à l'ordinateur, tout en étant alimenté, d'envoyer ses données directement via le réseau électrique. Les informations sont superposées au courant électrique à 50 Hz par l'ajout d'un signal à plus haute fréquence. Selon la nature et le « poids » (nombre d'octets) des données, l'envoi se fait en bas débit par l'utilisation d'une faible bande passante (textes, images, sons) ou en haut débit par une bande passante plus large découpée en plusieurs sous-canaux (connexion Internet, vidéos à la demande).
- **Conversion du signal électrique en signaux lumineux :** Le signal électrique parvient jusqu'à une LED qui est également connectée au réseau via un adaptateur CPL. Équipée d'un système de traitement à la fois analogique et numérique, elle le convertit en signaux lumineux qu'elle émet quand elle est allumée.
- **Réception et traitement des signaux lumineux :** Les appareils (ordinateur, tablette, téléphone) situés dans la zone d'éclairage (quelques mètres) reçoivent les données transmises grâce à leur récepteur Li-Fi. Il se compose d'un détecteur des signaux lumineux (photodétecteur), d'un amplificateur « trans-impédance » pour la conversion en signal électrique et d'un système de traitement du signal pour démoduler les données numériques. Des pistes de recherches visent à intégrer aux récepteurs des petites LEDs ou des dispositifs de lumière infrarouge qui émettront des signaux lumineux pour une communication

bidirectionnelle. Cela implique également que la LED du plafond possède un récepteur Li-Fi.

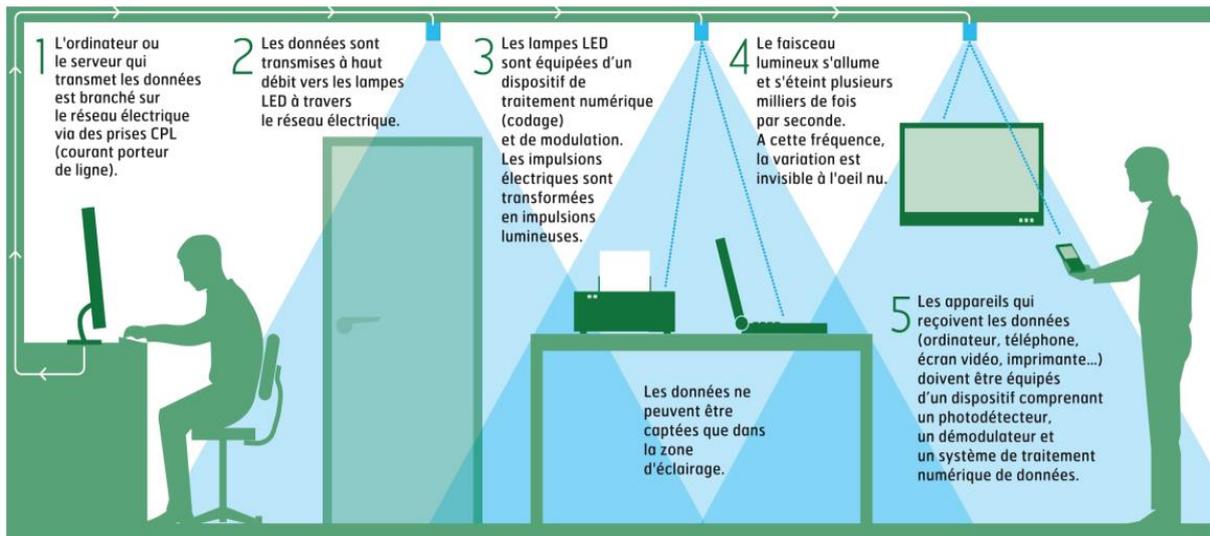


Figure II.2 : Fonctionnement d'un réseau Li-Fi. [27]

II.6 Types de modulation d'un système Li-Fi

Les signaux de modulation sont utilisés pour commuter les LEDs aux fréquences souhaitées contenant les informations à transmettre. La technologie Li-Fi possède plusieurs techniques de modulation. Ces techniques sont nécessaires pour que la communication reste disponible même si l'éclairage n'est pas requis. De ce fait, une technique de modulation peut prendre en charge une illumination dimmable. L'intensité de la lumière varie en fonction de l'information contenue dans le signal du message. Parmi les types de modulation utilisés pour cette technologie : la modulation à porteuse unique (SCM, Single Carrier Modulation), la modulation à porteuses multiples (MCM, Multi Carrier Modulation) et la modulation de couleur.

II.6.1 Modulation sur une seule porteuse (SCM)

Les techniques de modulation sur porteuse unique (SCM) sont relativement simples à mettre en œuvre dans les communications par la lumière. On citera parmi d'autres les techniques dites « On-Off Keying » (OOK), « Pulse-Position », « Pulse-Width » et « Pulse-Amplitude ». Le contrôle de l'éclairage peut être pris en charge en ajustant les intensités lumineuses des états « on » et « off » à +/- 10% du niveau de base, sans affecter les performances du système. Différents types d'impulsions (symboles) sont utilisés, tels que les codes « Non-Return-to-Zero » ou Manchester.

Mais, pour la communication haut débit, les performances des techniques SCM se détériorent fortement à mesure que les débits augmentent. Ceci est dû en grande partie au fait que les composants front-end utilisés sont sur étagère et à faible coût, avec des non linéarités tension/luminance importantes et une bande passante de modulation limitée pour l'architecture des luminaires LED standards. C'est une caractéristique très différente des systèmes RF, pour lesquels la principale source de non-linéarité est l'amplificateur de puissance. Des techniques d'égalisation sophistiquées avec différents degrés de performance et de complexité de calcul, ainsi que de consommation d'énergie, sont nécessaires pour que les techniques SCM soient efficaces à des débits de données élevés, ce qui les rend en pratique rédhibitoires. [34]

II.6.2. Modulation sur plusieurs porteuses (MCM)

Pour la communication optique sans fil à haut débit, la modulation multi- porteuse (MCM) est privilégiée. Le Li-Fi repose sur le principe « Orthogonal Frequency Division Multiplexing » (OFDM) par lequel des flux de données parallèles sont transmis simultanément à travers une série de sous-porteuses orthogonales. Les spectres des sous-porteuses individuelles se chevauchent, mais en raison de la propriété d'orthogonalité, les sous-porteuses peuvent être démodulées sans interférence. L'espacement des sous-porteuses est l'inverse de la durée de symbole et leur largeur de bande est conçue de sorte qu'elle soit plus petite que la largeur de bande de cohérence d'un canal afin d'omettre des circuits d'égalisation complexes. [34]

La figure II.3 résume les différents types des modulations utilisés par la technologie Li-Fi.

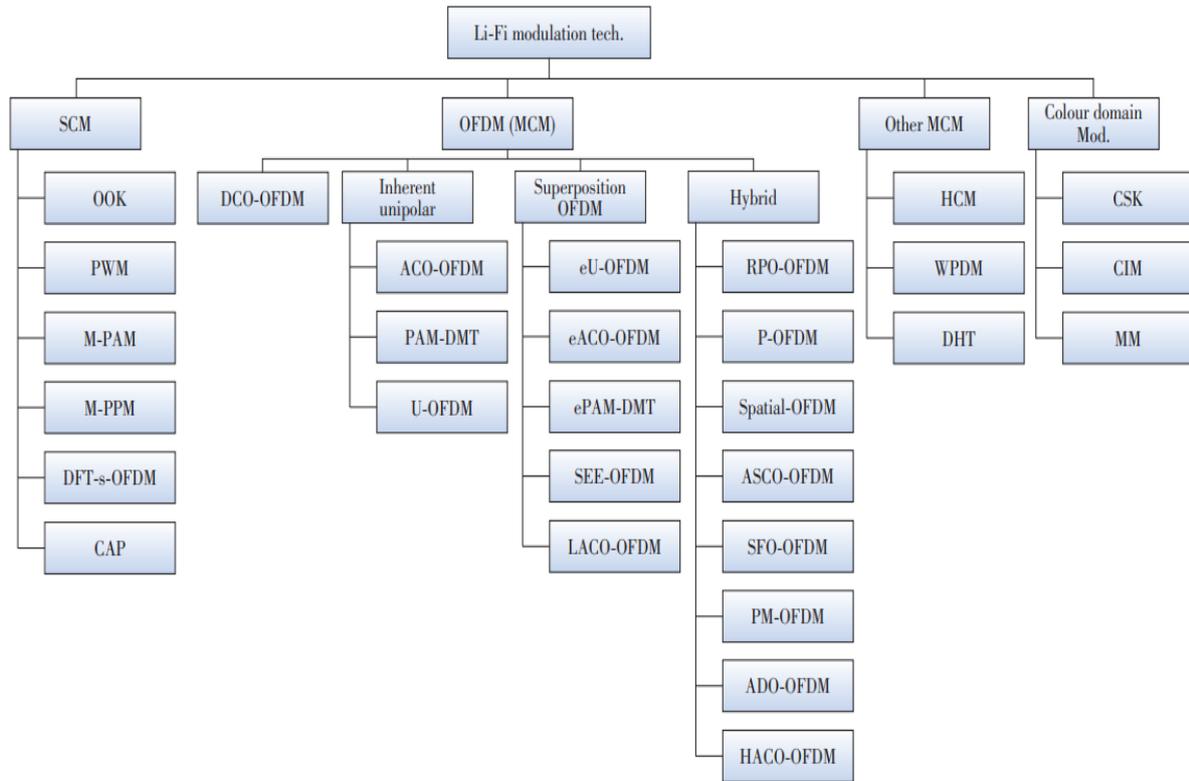


Figure II.3 : Techniques de modulation du Li-Fi. [35]

Les caractéristiques des modulations les plus importantes sont présentées dans le tableau II.1.

Tableau II.1 : Caractéristiques des techniques de modulation du Li-Fi. [16]

Modulation	Caractéristique	
SCM	OOK	Transmission des données en allumant et éteignant les voyants de manière séquentielle, la fiabilité de la portée de communication diminuerait à des niveaux de gradation faibles; et en augmentant et en diminuant la luminosité de la LED, le débit de données diminuerait.
	PPM	Fournit un support de gradation efficace en modulation de position d'impulsion variable (VPPM).

	PAM	Sensible à la distorsion du signal, combinaison avec une autre technique de modulation pour obtenir de meilleures performances.
MCM	OFDM	Excellent pour les situations dans lesquelles plusieurs émetteurs sont utilisés simultanément; évite les effets d'ombre, les interférences peuvent être atténuées en déplaçant la bande passante du système vers une fréquence plus élevée.
	DCO-OFDM	Dissipation d'énergie substantielle due à la polarisation.
	ACO-OFDM	Efficace en termes de puissance optique pour une valeur de SNR inférieure pour le canal IM/DD.
	PAM-DMT	Meilleure efficacité de la puissance optique par rapport au DCO-OFDM.
	AHO-OFDM	Prend en charge divers objectifs de gradation pour atteindre les performances du système.
	Flip-OFDM	Équivalent à l'ACO-OFDM en termes d'efficacité spectrale et de performance d'erreur.
	U-OFDM	Équivalent à l'ACO-OFDM en termes d'efficacité spectrale et de performance d'erreur.

II.7 Caractéristiques d'un réseau Li-Fi

Le Li-Fi n'est pas seulement un câble photonique virtuel, c'est un système sans fil complet, offrant une communication mobile, bidirectionnelle et multiutilisateur, au sein d'un réseau sans fil constitué de très petites cellules optiques, et donc avec une densité de connections potentielles très élevée. Chaque luminaire Li-Fi est un point d'accès. [34]

II.7.1 Accès multiples

Pour la communication multi-utilisateurs, l'OFDM optique fournit nativement une technique d'accès multiple appelée OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple

Access), qui est également la méthode d'accès pour la nouvelle norme Wi-Fi 801.11ax où les utilisateurs de données diffusées par un luminaire donné sont séparés par un certain nombre de sous-porteuses orthogonales. [34]

Avec les schémas OFDMA, les ressources sont partitionnées en domaine temporel et fréquentiel, comme indiqué sur la figure II.4. Ces blocs temps-fréquence sont appelés *blocs de ressources* (RB, Resource Block) et chaque RB contient un certain nombre *d'unités de ressources* (RU, Resource Unit), qui sont les intervalles de temps-fréquence minimum et indivisibles. Il est évident que l'attribution de ces RU à différents utilisateurs est plus efficace et plus flexible que l'attribution de sous-porteuses ou de créneaux horaires uniquement.

En outre, grâce aux canaux sélectifs en fréquence, une affectation adaptative utilisateur-RU est capable d'améliorer sensiblement l'efficacité spectrale du système global par rapport aux systèmes d'accès par multiplexage par répartition dans le temps (TDMA, Time Division Multiple Access). Dans les recherches récentes sur les systèmes Li-Fi, l'OFDMA a été utilisé pour l'allocation des ressources (voir figure II.4). [36]

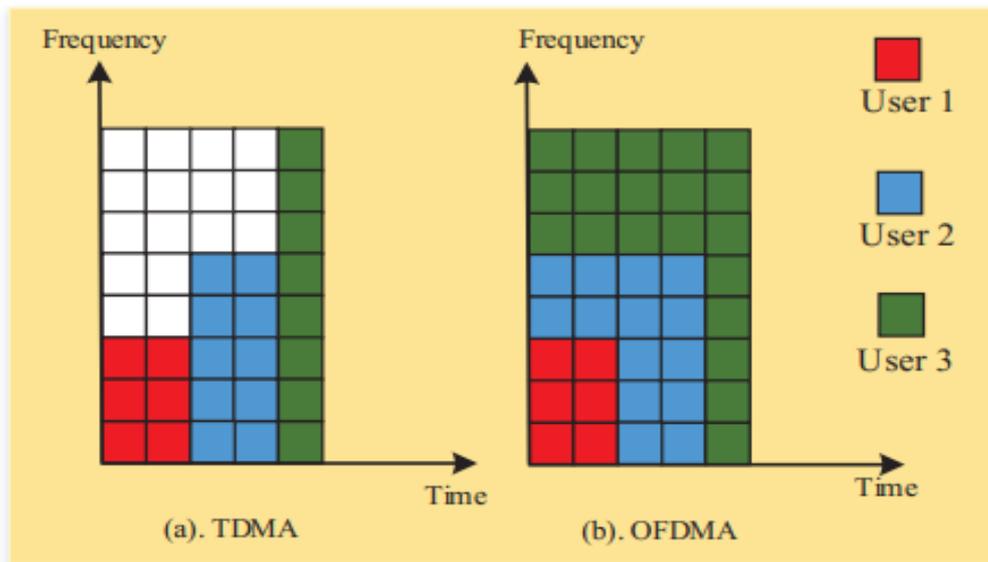


Figure II.4 : Allocation de ressources pour TDMA et OFDMA. [36]

II.7.2 Duplex

Pour un système de communication Li-Fi complet, une communication en mode duplex est nécessaire, c'est-à-dire qu'une connexion montante des terminaux mobiles au point d'accès optique doit être fournie. Les techniques de duplex RF où la liaison descendante et la liaison montante sont séparées par des créneaux temporels différents ou des bandes de fréquences

différentes pourraient être transposées. Mais l'émission d'une lumière blanche intense par le terminal récepteur n'est pas acceptable en pratique. [34] Comme expliqué dans [13], l'utilisation de la transmission infrarouge (IR) est une option viable pour établir un canal de communication sur la liaison montante. Certaines entreprises telles que Lucibel ou PureLifi ont pu créer un modem Li-Fi duplex intégral disponible dans le commerce utilisant la lumière infrarouge pour le canal de liaison montante. Il est également possible d'utiliser la communication RF pour la liaison montante. Dans cette configuration, le Li-Fi peut être utilisé pour décharger une grande partie du trafic de données du réseau RF, fournissant ainsi un allègement significatif du spectre RF. Ceci est particulièrement pertinent car il existe un déséquilibre de trafic en faveur de la liaison descendante dans les systèmes de communication sans fil actuels qui rend le canal de liaison montante considérablement moins sollicité.

II.7.3 L'attocell

Dans les communications sans fil RF, le réseau est distribué spatialement sur des cellules, chacune desservie par au moins une station de base fixe. En 4G LTE (Long Term Evolution), afin d'améliorer l'accès des utilisateurs, le réseau est densifié par l'addition de cellules de différentes tailles appelées macro-, micro-, pico- et femto-cells dans l'ordre décroissant de la puissance de la station de base. L'objectif est de donner la possibilité aux utilisateurs d'avoir une bande passante élevée sans être tous connectés sur le même point d'accès, qui a une capacité fixée. Mais cela génère des interférences inter et intra-cellulaire, et leur réduction est l'un des défis les plus critiques pour le fonctionnement simultané de ces cellules. Les réseaux sans fil de nouvelle génération 5G devraient par ailleurs voir l'incorporation du WiFi dans des réseaux dits hétérogènes.

Le concept de cellule est facilement transposable au Li-Fi et le point d'accès optique associé à un luminaire Li-Fi est fréquemment appelé « attocell » en raison de sa petite taille, qui est la zone éclairée par un luminaire. Grâce à la forte densité des luminaires et à l'éclairage presque uniforme, les attocells optiques peuvent améliorer considérablement la couverture et la densité de connections sans interférence. Dans une configuration mixte LiFi/WiFi, le Li-Fi soulage le réseau WiFi de façon à maintenir la qualité de service pour l'utilisateur. Chaque utilisateur bénéficie de la bande passante disponible au niveau de chaque luminaire, sans avoir à la partager avec son voisin situé sous un autre luminaire. Cette idée de « densification des connections » est un point clé pour le Li-Fi par rapport au Wi-Fi, au même titre que le débit par luminaire.

De plus, alors que des techniques complexes de formation de faisceau sont développées pour les systèmes sans fil RF de prochaine génération (5G) afin d'assurer la connexion à haut débit, c'est une fonctionnalité native pour les communications par la lumière. Il faut noter que, à l'instar des systèmes RF, le MIMO (Multiple Input-Multiple Output) en Li-Fi et plus généralement en VLC est susceptible d'apporter une amélioration du débit. [34]

II.7.4 Effet Handover

L'effet Handover, aussi appelé **transfert intercellulaire** est défini comme le processus de transfert de la gestion d'une session de transmission sans fil en cours d'un point d'accès actuel à un autre point d'accès. Un transfert intercellulaire est normalement requis dans le cas où un terminal mobile quitte la zone de couverture d'un point d'accès et se déplace dans la zone de couverture d'un point d'accès adjacent. Dans certains cas, un transfert intercellulaire est également requis si le canal de transmission est gravement dégradé en raison d'interférences ou si la cellule en cours est entièrement chargée. Le transfert intercellulaire qui découle de ces deux scénarios est généralement classé en tant que transfert intercellulaire horizontal puisqu'il se produit entre des points d'accès appartenant au même réseau.

Cependant, il existe généralement plusieurs technologies d'accès telles que le WiFi, le LTE et le Li-Fi. Cela signifie qu'il existe différents types de nœuds d'accès dans un réseau hétérogène à différents emplacements. Si un équipement d'utilisateur passe de l'intérieur à l'extérieur où il n'y a peut-être pas de couverture Li-Fi, un transfert transparent de Li-Fi à LTE sera déclenché. Ce transfert entre les points d'accès de différents systèmes est classé dans la catégorie transfert vertical.

En règle générale, il existe deux types de Handover : le hard Handover et le soft Handover. Dans un processus de hard Handover, l'équipement de l'utilisateur est déconnecté du point d'accès auquel il est connecté avant de se connecter au suivant, ce qui est plus simple à mettre en œuvre et présente une complexité matérielle inférieure. Cependant, le service pourrait être interrompu au cours de ce transfert intercellulaire.

Dans un processus de soft Handover, l'équipement de l'utilisateur reste connecté au point d'accès auquel il est connecté jusqu'à ce qu'une connexion avec le point d'accès suivant soit établie. Ce type de Handover offre une meilleure expérience utilisateur, mais nécessite d'avantage de ressources de transmission sans fil. Avec la diminution de la taille des cellules, la fréquence de transfert intercellulaire devrait augmenter. L'augmentation du nombre de

sessions de transfert intercellulaire entraîne une perte de débit du système et une dégradation de la qualité de service. [37]

II.8 Standardisation

La technologie Li-Fi utilise le principe de base des communications par lumière visible, soit le standard IEEE 802.15.7 mais la technologie Li-Fi en elle-même n'est pas encore standardisée. Le 18 Juillet 2018, l'organisation internationale IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) a officialisé la création du futur standard Li-Fi 802.11bb. [38]

« La rédaction de ce nouveau standard Li-Fi sera achevée d'ici début 2021. Cependant, les fabricants d'appareils [smartphones, ordinateurs, tablettes...] qui souhaitent commencer à développer des produits nativement Li-Fi peuvent déjà utiliser les premières versions de la norme » explique Nikola Serafimovski, membre de l'IEEE et président du groupe de travail 802.11bb sur les communications par la lumière. En effet, la création du standard va résoudre la problématique de l'interopérabilité entre les appareils connectés en Li-Fi, et permettre ainsi aux fabricants de smartphones, d'ordinateurs et de tablettes d'intégrer nativement la fonctionnalité Li-Fi, comme l'est aujourd'hui la fonctionnalité WiFi. [39]

II.9 Différence entre le Li-Fi et le VLC

Le Li-Fi peut être considéré comme un système de réseau plus avancé que le VLC car il peut fournir une communication point à multipoint. Ces caractéristiques de communication point à multipoint du système Li-Fi les rendent différents des systèmes à base VLC, car le VLC ne prend en charge que le système de communication point à point.

Le Li-Fi est une continuation de la technologie VLC qui utilise des LEDs pouvant fournir un système sans fil en réseau approprié avec une communication à haute vitesse. [40]

Michel Germe, fondateur de la société Luciom, précise qu'entre le VLC et le Li-Fi, le vecteur de communication utilisé est le même, c'est-à-dire l'utilisation de l'infrastructure d'éclairage LED. Néanmoins, une différence significative existe entre les deux solutions. Le dirigeant de Luciom les précise :

- Le VLC est un terme utilisé lorsque l'on parle de modulation de l'éclairage LED pour transmettre un identifiant. Cette technologie est donc typiquement utilisée pour des applications de géolocalisation. D'autres termes similaires sont utilisés, tels que: coded light, Li-Fi TAG,

Geo VLC. Dans tous ces cas, il s'agit d'un lien unidirectionnel, de la lampe LED jusqu'au récepteur.

- Le Li-Fi est, quant à lui, assimilé à un équivalent du Wi-Fi; c'est-à-dire un lien bidirectionnel haut débit. [41]

II.10 Le Li-Fi face au Wifi

Le Li-Fi est un terme utilisé pour décrire la technologie de communication à lumière visible appliquée à la communication sans fil à haute vitesse. Il a acquis ce nom en raison de la similitude avec le Wi-Fi, en utilisant uniquement la lumière au lieu de la radio. Le Wi-Fi est idéal pour la couverture sans fil générale dans les bâtiments, tandis que la technologie Li-Fi est idéale pour la couverture de données sans fil haute densité dans des zones confinées et pour réduire les problèmes d'interférence radio. Les deux technologies peuvent donc être considérées comme complémentaires. Les fonctionnalités Li-Fi incluent des avantages en termes de capacité, d'efficacité énergétique, de sécurité et de sûreté d'un système sans fil. Elles présentent un certain nombre d'avantages essentiels par rapport au Wi-Fi, mais constituent par nature une technologie complémentaire. Le tableau II.2 représente une étude comparative entre ces 2 technologies sur différents points.

Tableau II.2 : Li-Fi vs Wifi. [42]

Paramètre	Li-Fi	Wi-Fi
Nom complet	Light Fidelity	Wireless Fidelity
Capacité	10000 fois plus que les ondes radio.	Les ondes radio ne forment qu'une petite fraction de l'ensemble du spectre EM.
Efficacité	Haute. Les LEDs consomment moins d'énergie et sont très efficaces.	Basse. Les stations de base radio consomment beaucoup de quantité d'énergie et la plupart d'elle est juste gaspillée à refroidir ces stations, diminuant ainsi l'efficacité.
Disponibilité	N'importe où. Il peut être disponible dans les avions, sous l'eau à l'aide d'ampoules LED.	Limité à cause des effets néfastes.

Sécurité	Plus sécurisé car les ondes lumineuses ne peuvent pas pénétrer à travers les murs et ne peuvent être interceptées par quiconque en dehors de l'illumination de la LED.	Moins sécurisé en raison de la faculté de dispersion élevée des ondes radio, tout le monde peut les intercepter en cours de route.
Année de création	2011	1999
Rapidité	500 Mbps, jusqu'à 10 Gbps, 100 Gbps	11 Mbps
Portée	10 mètres	20-100 mètres
Standard	Pas encore normalisé (802.11bb)	802.11 a / b / g / n / ac / ad
Gamme de fréquences	10000 fois plus que le Wi-Fi (430–770 THz)	Spectre radio compris entre 3 Hz à 3000 GHz
Topologie de réseau	Point-à-multipoint	Point-à-multipoint
Communication	Basé sur la communication par lumière visible	Basé sur la communication par radiofréquence
Transport	Informations acheminées via des intensités optiques.	Informations acheminées sur un champ électrique.
Outil de routage	LEDs	Points d'accès
Coût de l'infrastructure	Bas	Plus élevé
Interférence avec des équipements électroniques	Pas d'interférences	Interférences avec les ondes radio
Rapport Signal sur Bruit	Très élevé en raison de la moindre distance entre l'émetteur et récepteur	Peut être plus élevé
Technique de formation de faisceau	10 mètres	20 à 100 mètres

Modulation	Direct Current biased Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing (DCO-OFDM)	Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)
Lieu d'usage	Partout où la lumière LED est disponible comme les routes, les maisons, les bureaux, etc.	Au sein de la gamme WLAN et de l'infrastructure utilisée.
Consommation d'énergie	Faible	Un peu plus
Architecture	AttoCell	FemtoCell
Impact sur l'environnement	Faible	Moyen

Outre ces points de comparaison, la technologie Li-Fi a de nombreux avantages comparée aux technologies RF non négligeables. Ces nombreux avantages ont été abordés au cours du chapitre I. Les avantages des communications par lumières visible VLC sont également présents pour la technologie Li-Fi car le principe d'utilisation de la lumière visible pour la communication reste le même.

II.11 Sécurité d'une communication Li-Fi

Les systèmes Li-Fi, ou les systèmes VLC en général, sont souvent considérés comme une solution aux problèmes d'espionnage (eavesdropping), en raison du fait que la lumière ne peut traverser les murs. Cette propriété est un point clé pour éviter aux personnes non légitimes d'accéder à des informations personnelles, mais cela ne suffit pas pour s'immuniser complètement de ce qu'on appelle des « renifleurs de réseau » (ou sniffers en anglais). Bien que le système propage les données demandées par un utilisateur principalement via le trajet en visibilité directe, le canal VLC a une nature de diffusion (broadcast), c'est-à-dire qu'il distribuera les données à tous les utilisateurs éclairés par les LEDs. Le nombre de ces utilisateurs peut être élevé, comme cela est le cas dans les espaces publics. Cela permettra à des utilisateurs non autorisés d'écouter les informations d'utilisateurs légitimes.

Selon [32], il existe trois mécanismes de sécurité pouvant être utilisés pour protéger les VLC dans la couche MAC : protection basée sur la proximité (communication LOS uniquement), protection stéganographique (chiffrement sans authentification ni intégrité), « le

frottement et le vannage » qui est une technique de cryptographie connue sous son nom anglais « Chaffing and Winnowing », (authentification sans chiffrement) et la protection cryptographique (chiffrement, intégrité et authentification) avec une implémentation simple et sans grande consommation de ressources d'énergie.

La cryptographie est nul doute une stratégie appropriée pour une transmission sécurisée. C'est l'une des techniques les plus répandues et les plus populaires pour sécuriser les données. Cela se fait essentiellement par l'utilisation de deux processus essentiels : le cryptage et le décryptage. Le cryptage, ou chiffrement, est le processus de codage des données qui permet d'empêcher les intrus de lire facilement les données d'origine. Cette étape permet de convertir les données d'origine en un format illisible appelé texte chiffré (ciphertext). Le prochain processus à effectuer par la personne destinataire est le déchiffrement ou décryptage. C'est le processus qui permet de convertir le texte chiffré en un texte clair (plaintext) lisible contenant le message original. Pour effectuer ces processus, la cryptographie repose sur des calculs mathématiques ainsi que sur des substitutions et des permutations avec ou sans clé. La cryptographie moderne assure la confidentialité, l'intégrité, la non-répudiation et l'authentification. [43]

II.12 Entreprises de commercialisation du Li-Fi

De nombreuses entreprises basées dans différents pays se sont intéressés à la commercialisation du Li-Fi.

La société française Lucibel s'est spécialisée dans la conception de solutions d'éclairage de nouvelle génération issues de la technologie LED. Elle a mis au point et est en train de mettre sur le marché le premier luminaire Li-Fi industrialisé d'Europe: Ores LiFi. La solution Li-Fi de Lucibel permet le déploiement d'un réseau sans fil complet via une transmission bidirectionnelle de 42 Mbit/s (débit théorique). Le système Li-Fi de Lucibel offre une connectivité mobile haut débit dans un réseau, tout en assurant l'accès multiple et le «transfert». Chaque luminaire Li-Fi peut desservir simultanément plusieurs stations (jusqu'à huit). La fonction de transfert permet automatiquement aux utilisateurs de disposer d'une connexion stable d'un luminaire à un autre. Plusieurs entreprises ont mis en œuvre cette solution Li-Fi au sein de leur centre tels que Sogeprom et Microsoft afin d'offrir à leurs clients une connectivité sans fil de prochaine génération.

La start-up française LUCIOM, créée en octobre 2012, a mis aux points plusieurs produits, notamment: le Geo VLC qui est constitué de kits d'émetteurs/récepteurs à faible largeur de bande pour la localisation en intérieur et dotés de différentes fonctionnalités, ainsi que des solutions à haut débit de données avec émetteurs Internet LED en LiFi et clés USB LiFi/infrarouge offrant des débits de données de 20 Mbit/s (liaison descendante) et de 5 Mbit/s (liaison montante). [3]

La société Oledcomm, leader sur le marché de la technologie Li-Fi, créée en 2011 et basée à Vélizy, en France, et à Abu Dhabi crée des solutions Li-Fi complètes telles que des microcontrôleurs (modem), des récepteurs photo Li-Fi (dongles et ponts) et des Cloud Li-Fi SDK (Software Development Kit) online et offline dédié. Après le succès mondial en 2018 de MyLiFi, la première lampe LiFi grand public, Oledcomm lance en 2019 le LiFiMAX, le premier plafonnier offrant une connexion internet par la lumière à 16 utilisateurs en simultanée, sur 28m². L'émetteur LiFiMAX est le plus puissant du monde, il permet aux utilisateurs équipés de dongles de se connecter simultanément à internet et de bénéficier d'une connexion ultra-sécurisée et ultra-rapide, en offrant un débit de 100 Mbps en flux descendant et 40 Mbps en flux montant. Il se fixe simplement sur le (faux) plafond d'une salle de réunion ou d'un espace de co-working et se branche sur une prise Ethernet. [44]

La start-up anglaise PureLiFi créée en 2012 par le professeur Haas de l'Université d'Edimbourg, pour mettre sur le marché des technologies de communication par lumière visible à l'issue de quatre années d'importants travaux de recherche. La société a tout d'abord mis au point un dispositif fixé au plafond appelé Li-Flame, permettant de fournir des communications avec un débit de 10 Mbit/s en liaison descendante et de 10 Mbit/s en liaison montante avec une portée maximale de 3 m au moyen d'un luminaire type LED. Le dispositif Li-Flame de pureLiFi est aujourd'hui, devenu le LiFi-X, une nouvelle génération de pilotes et de récepteurs qui ont été présentés à l'occasion du Mobile World Congress de 2016. Le LiFi-X fournit un point d'accès qui permet d'assurer une connexion avec un éclairage LED utilisant le Li-Fi. Elle offre des communications en duplex intégral avec un débit de 40 Mbit/s en liaison descendante et de 40 Mbit/s en liaison montante et assure une parfaite mobilité avec plusieurs utilisateurs par point d'accès au Li-Fi.

La start-up américaine Basic6 a mis au point un système de positionnement en intérieur appelé GeoLiFi. Ce système utilise l'infrastructure d'éclairage d'une grande surface pour envoyer, de manière anonyme, aux clients et aux employés des messages de proximité, des

informations sur des produits et des promotions et des listes d'achats visuelles. Parallèlement, la solution permet au détaillant de recevoir des analyses détaillées de paramètres tels que les taux de participation des clients et des employés ainsi que les temps de passage dans les grands magasins. Cette société élabore des logiciels et collabore activement avec d'autres entreprises d'éclairage fournissant du matériel pour les communications en Li-Fi.

La start-up estonienne Velmenni a testé avec succès la technologie Li-Fi dans divers bureaux et sur divers sites industriels de Tallinn (Estonie) et met actuellement en œuvre de nombreux projets pilotes visant à utiliser les communications par lumière visible dans divers contextes industriels (en collaboration avec Airbus pour tester la technologie à bord d'aéronefs). Le prototype comprend un émetteur-récepteur LED et un récepteur par photodétecteur externe, relié à un ordinateur portable par câble USB. Le système fonctionne en mode duplex (liaison montante et liaison descendante) et les débits de données annoncés n'atteindraient pas moins de 1 Gbit/s. Les distances démontrées entre l'émission et la réception sont de l'ordre de plusieurs dizaines de cm. Cependant, le prototype ne sera pas commercialisé avant plusieurs années.[3]

D'autres entreprises travaillent sur le Li-Fi sans donner de solutions concrètes pour l'instant, comme Renesas ou Thomson. [8]

II.13 Conclusion

Ce chapitre a présenté le principe de fonctionnement du Li-Fi, ainsi que les caractéristiques d'un tel système de communication. C'est un système sans fil complet, offrant une communication mobile, bidirectionnelle et multiutilisateur.

La technologie Li-Fi est une technologie naissante qui peut être une alternative intéressante et viable aux soucis rencontrés avec le Wi-Fi. Différents points de comparaison entre ces deux technologies ont été abordés au cours de ce chapitre. Le Li-Fi pourrait se démarquer car il possède une double utilité, à savoir l'éclairage et la communication de données, deux secteurs porteurs, particulièrement celui des LEDs pour l'éclairage.

Cependant, la technologie Li-Fi semble pour l'instant être mieux adaptée à un usage professionnel de par le manque de matériel grand public compatible. Le Li-Fi ne cesse de se développer et suscite l'intérêt d'un grand nombre d'entreprises pour permettre d'étendre sa commercialisation aux particuliers. Ces entreprises ont été décrites brièvement.

Cette technologie ne sera sans doute pas dans tous les foyers demain, mais elle a certainement un avenir prometteur et nul doute qu'on en entendra parler dans un futur proche.

Chapitre 3 :

Conception d'un système

Li-Fi

Sommaire

III.1 Introduction

III.2 Mise en place

III.3 Présentation de l'environnement de travail

III.4 Montage de réalisation

III.5 Programmation

III.6 Visualisation de la communication

III.7 Sécurisation de la transmission

III.8 Résultats de la transmission avec différents photodétecteurs

III.9 Résultats finals

III.10 Conclusion

Chapitre 3 :

Conception d'un système Li-Fi

III.1 Introduction

Après avoir abordé les caractéristiques d'une communication Li-Fi au cours du chapitre précédent, la conception d'un tel système va être étudiée durant ce chapitre. Le but de ce projet est de créer un dispositif de communication pour permettre l'échange de données en instantané, efficacement entre deux appareils. La communication sera donc en mode duplex, une même personne pourra ainsi émettre et recevoir des données sans rien changer à la conception de son système. Une protection cryptographique va également être implémentée dans ce système pour assurer la sécurité des données.

III.2 Mise en place

Les systèmes de transmission numériques véhiculent l'information entre l'émetteur et le récepteur via un support tel que les câbles, la fibre optique, les ondes électromagnétiques...etc. Pour une communication Li-Fi, le support de transmission est la lumière.

Le schéma synoptique d'un système de transmission numérique de base est représenté à la figure III.1. L'émetteur est constitué d'une source qui génère le message à transmettre, ce message est ensuite codé et modulé pour permettre sa transmission dans le canal. Au niveau de la réception, ce signal sera démodulé et décodé pour pouvoir ainsi être déchiffré par le destinataire.

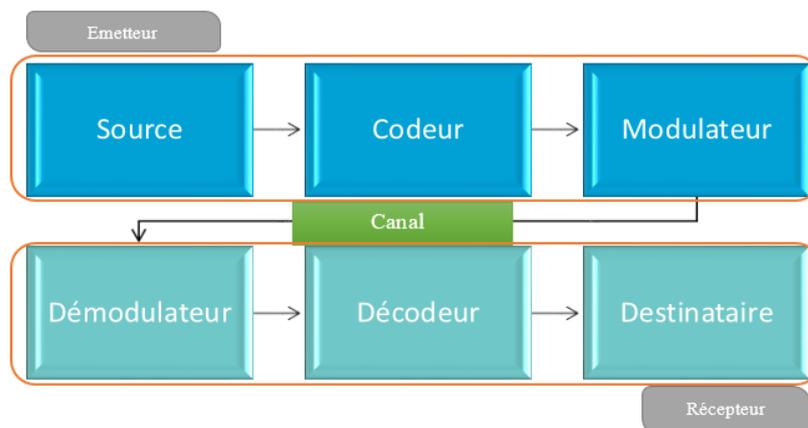


Figure III.1 : Schéma synoptique d'un système de transmission numérique.

Pour mener à bien ce projet, le système présenté par la figure III.2 a été mis en place. La LED servira à envoyer la source du signal qui sera réceptionnée par un photodétecteur, le tout contrôlé par un microcontrôleur Arduino UNO à l'émission et un autre à la réception.

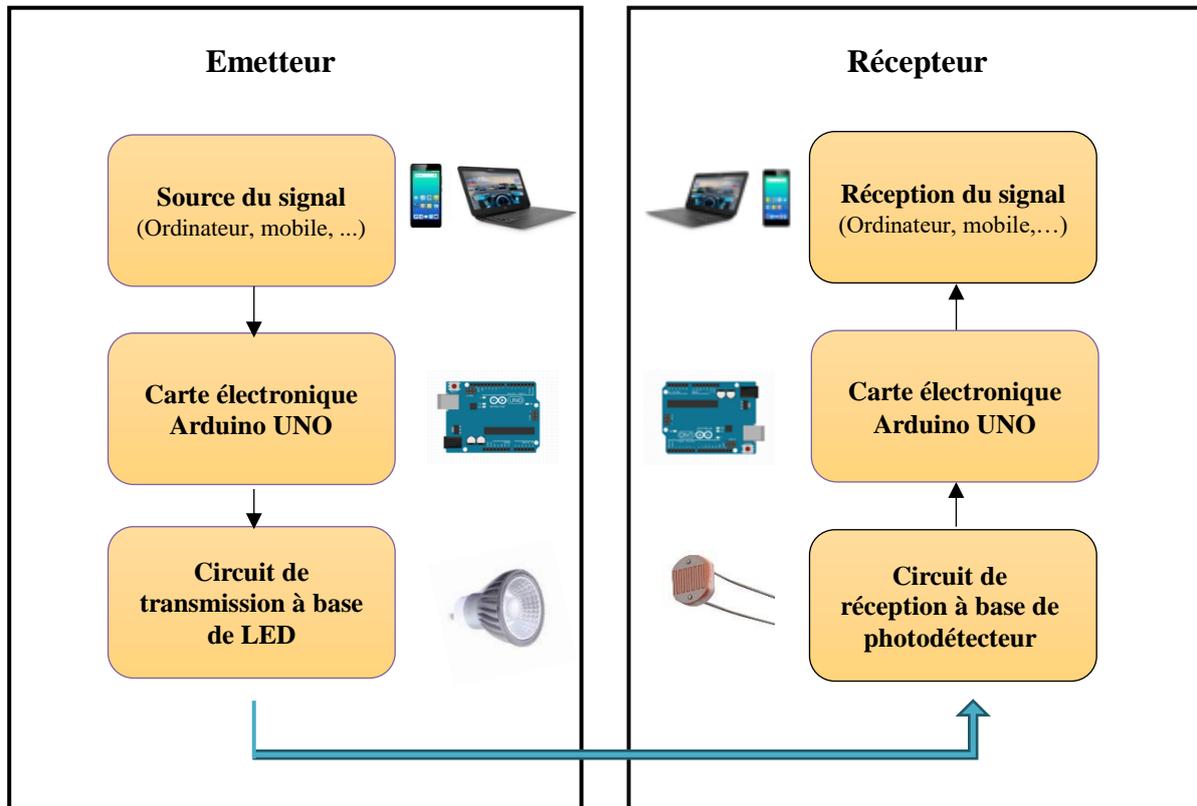


Figure III.2 : Schéma synoptique du système de communication Li-Fi réalisé.

III.3 Présentation de l'environnement de travail

Le travail a été effectué à l'aide d'un ensemble de composants indispensables au bon fonctionnement du système de communication Li-Fi réalisé.

III.3.1 L'Arduino UNO

L'Arduino est une plateforme de prototypage électronique open-source, basée d'une part sur du matériel et d'autre part sur un ensemble de logiciel facile d'utilisation. Les cartes Arduino peuvent lire des entrées (lumière sur un capteur, doigt sur un bouton...etc.) et en faire une sortie : activer un moteur, allumer une LED, publier quelque chose en ligne...etc.

La caractéristique première d'une carte Arduino est le type de MCU (Microcontroller Unit) dont elle est équipée. Actuellement, et probablement pour encore longtemps, deux familles de microcontrôleurs sont employées : des AVR 8 bits de la société ATMEL et des ARM 32 bits de la série Cortex-M, conçus par la société Advanced RISC Machines et fabriqués

par différents fondeurs, ATMEL pour les cartes officielles mais aussi Freescale ou STMicro pour des cartes compatibles gravitant autour de la galaxie Arduino.

Il existe plusieurs cartes Arduino dont les caractéristiques sont plus ou moins riches. La carte la plus utilisée est l'Arduino Uno. Il s'agit d'une carte équipée d'un microcontrôleur de la famille AVR 8 bits : l'ATMega328. [45] La figure III.3 représente l'anatomie d'une telle carte.

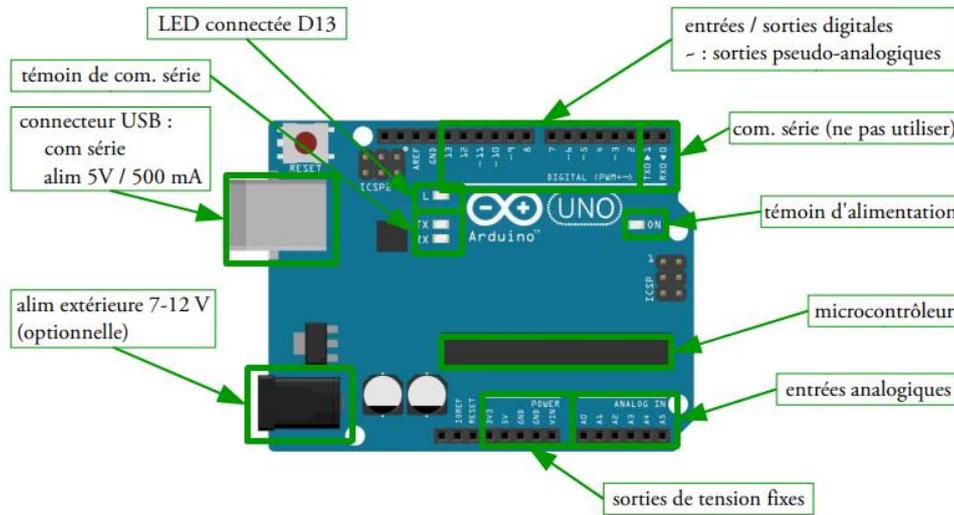


Figure III.3 : Anatomie d'une carte Arduino UNO. [46]

Le tableau III.1 résume toutes les principales caractéristiques de cette carte.

Tableau III.1 : Caractéristiques d'une carte Arduino UNO. [47]

Microcontrôleur	ATmega328
Tension de fonctionnement	5V
Tension d'alimentation (recommandée)	7-12V
Tension d'alimentation (limites)	6-20V
Broches E/S numériques	14 (dont 6 disposent d'une sortie PWM)
Broches d'entrées analogiques	6 (utilisables en broches E/S numériques)
Intensité maxi disponible par broche E/S (5V)	40 mA (200mA cumulé pour l'ensemble des broches E/S)
Intensité maxi disponible pour la sortie 3.3V	50 Ma

Intensité maxi disponible pour la sortie 5V	Fonction de l'alimentation utilisée - 500 mA max si port USB utilisé seul
Intensité maxi disponible pour la sortie 5V	Fonction de l'alimentation utilisée - 500 mA max si port USB utilisé seul
Mémoire Programme Flash	32 KB (ATmega328) dont 0.5 KB sont utilisés par le bootloader
Mémoire SRAM (mémoire volatile)	2 KB (ATmega328)
Mémoire EEPROM (mémoire non volatile)	1 KB (ATmega328)
Vitesse d'horloge	16 MHz

La façon dont le microcontrôleur gère ses entrées/sorties est fixée par un programme contenu dans le microcontrôleur. Ce programme doit être écrit par l'utilisateur. En pratique, l'utilisateur écrit le programme en langage C, en utilisant un environnement de développement spécialisé appelé IDE (Integrated Development Environment) installé sur un ordinateur (figure III.4). Ce programme est ensuite compilé et téléversé dans le microcontrôleur par liaison série (USB). Le modèle de la carte Arduino ainsi que le port série sur lequel elle est branchée doivent être déclarés dans le menu de l'IDE Outils/type de carte et Outils/port série.

Une fois téléversé dans le microcontrôleur, le programme s'exécute. La fonction « setup » s'exécute une seule fois, la fonction « loop » s'exécute en boucle. [46]

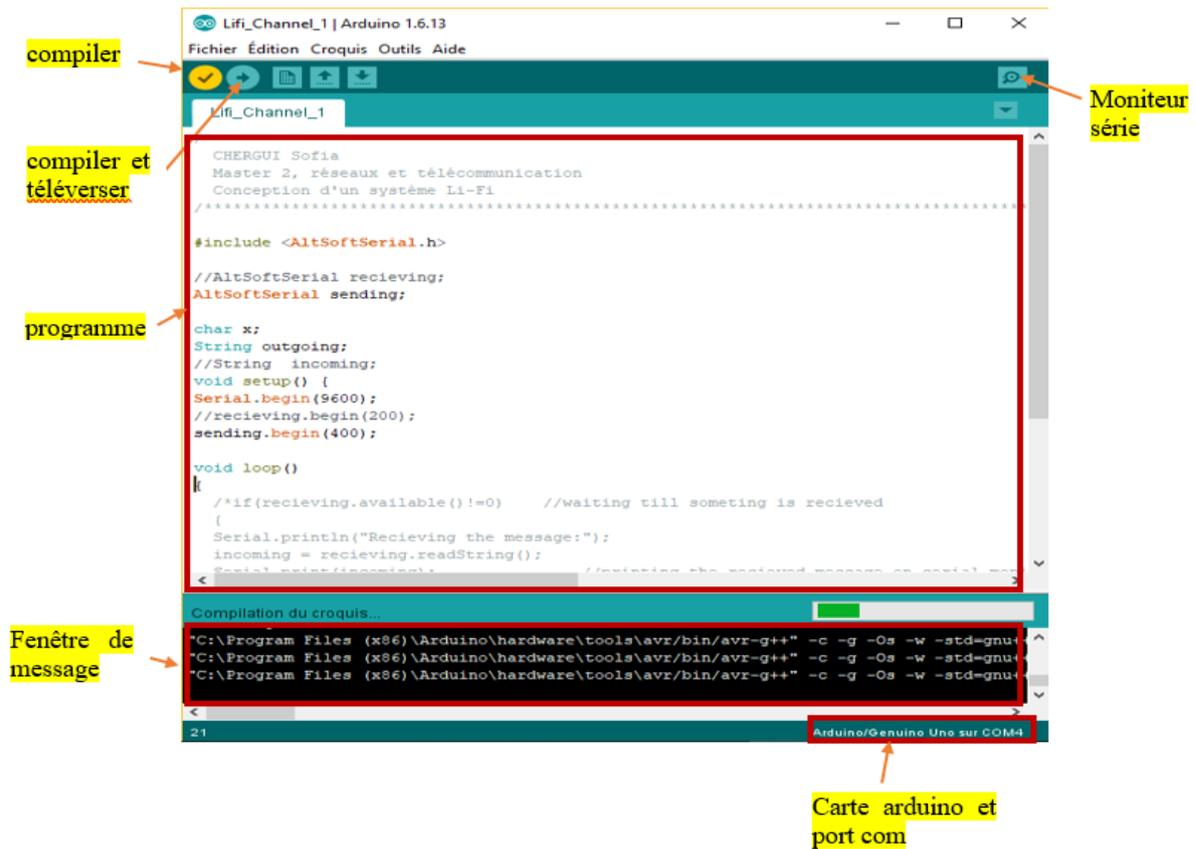


Figure III.4 : IDE Arduino.

III.3.2 Les LEDs

Le Li-Fi n'aurait pas pu se développer, ni même voir le jour si les lampes à LED n'avaient pas été inventées (figure III.5). Une diode électroluminescente, abrégée sous les sigles DEL ou LED (de l'anglais Light-Emitting Diode), est un composant électronique capable d'émettre de la lumière quand il est parcouru par un courant électrique. Une diode électroluminescente ne laisse passer le courant électrique que dans un seul sens et produit un rayonnement monochromatique incohérent à partir d'une transformation d'énergie. [48]

Le Li-Fi ne peut fonctionner qu'avec des LEDs parce que les LEDs s'allument et s'éteignent de façon stroboscopique avec des valeurs de clignotement phénoménales totalement indécélabes pour la rétine de l'œil, donc par le cerveau via le nerf optique.

A la différence des LEDs, les lampes fluo compactes génèrent 100 scintillements/s détectables par la rétine ce qui provoquent des troubles oculaires, une fatigue et un vieillissement précoce des organes de vue. Coté débit, les LEDs sont performantes puisqu'actuellement elles atteignent plusieurs centaines de Mb/s, les chercheurs de l'institut allemand Fraunhofer (Consortium Li-Fi) ont obtenu en laboratoire un flux de 800 MB/s, sur ce

point les progrès devraient être très rapides. Coté performance concernant la distance de transmission, en intérieur il n'y a aucun problème pour être dans le champ de diffusion (de lumière), en extérieur cela dépend de la puissance de la LED. [31]



Figure III.5 : LEDs.

III.3.3 Les photodétecteurs

Un photodétecteur (ou détecteur photosensible ou détecteur optique ou détecteur de lumière) est un dispositif qui transforme la lumière qu'il absorbe en une grandeur mesurable généralement un courant électrique ou une tension électrique. [49] Les photodétecteurs les plus utilisés pour capter la lumière sont les photorésistances, les photodiodes et les phototransistors.

III.3.3.1 Photorésistance :

Une photorésistance (figure III.6) est un composant dont la valeur en ohms dépend de la lumière à laquelle elle est exposée. On la désigne aussi par LDR (Light Dependent Resistor). La principale utilisation de la photorésistance est la mesure de l'intensité lumineuse (appareil photo, systèmes de détection, de comptage et d'alarme...). Les matériaux utilisés dans les photorésistances sont généralement du sulfure ou du sélénure de cadmium qui se comportent comme des semi-conducteurs. [50]

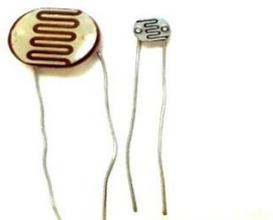


Figure III.6 : LDR.

Il existe des modules LDR compatible avec l'Arduino. Le module capteur LDR (figure III.7) génère une sortie 5V dans l'obscurité et 0V en pleine lumière. La sensibilité de la LDR peut être ajustée via un potentiomètre ajustable placé sur le module.

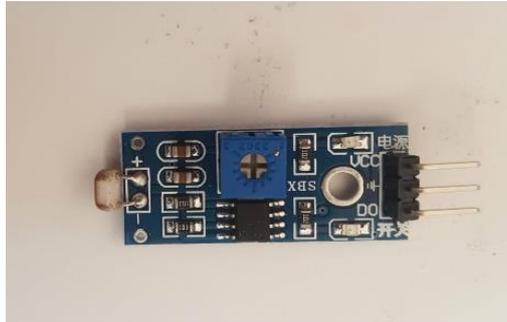


Figure III.7 : Module LDR Arduino.

III.3.3.2 Photodiode

Une photodiode (figure III.8) est exactement le contraire d'une LED. Au lieu d'émettre de la lumière, la photodiode absorbe la lumière et produit du courant. Ce courant peut être augmentée si la tension est appliquée à la photodiode, ce qui est un processus appelé *polarisation*. Techniquement, la photodiode est polarisée en inverse, ce qui signifie que la tension se déplace au travers de la cathode vers l'anode, la direction opposée d'une LED. De même, le courant qui se produit est appelé *inversion de courant* et la quantité produite dépend de la luminosité de la lumière. La photodiode est très utile car, avec quelques autres composants, elle peut agir comme un interrupteur sensible à la lumière. [51]



Figure III.8 : Photodiode.

III.3.3.2 Phototransistor

Un phototransistor (figure III.9) est un dispositif qui convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique. Le phototransistor est constitué d'un semi-conducteur bipolaire et concentre l'énergie qui passe en lui. Comme les transistors, le phototransistor est conçu selon une base, un émetteur et un collecteur. Un type commun de phototransistor est ce qu'on appelle un transistor bipolaire enveloppé dans une coque transparente qui permet à la lumière d'atteindre la jonction du collecteur de base. Lorsque la base est éclairée le phototransistor est équivalent

à un interrupteur fermé entre l'émetteur et le collecteur et lorsque la base n'est pas éclairée, cela est équivalent à un interrupteur ouvert.[52] Le phototransistor utilisé pour ce projet est un phototransistor de type BPW40 (voir annexe A).



Figure III.9 : Phototransistor.

III.3.4 Les transistors

Composant électronique constitué de matériaux semi-conducteurs utilisé pour redresser ou amplifier des oscillations électriques. Il permet de contrôler un courant ou une tension sur l'électrode de sortie. Les transistors utilisés au cours de ce projet sont le 2N2222 et le BD139.

III.3.4.1 Transistor 2N2222

Le 2N2222 (figure III.10) est un transistor NPN à jonction bipolaire commun utilisé pour les applications d'amplification ou de commutation de faible puissance à usage général. Il est conçu pour un courant faible à moyen, une puissance faible, une tension moyenne et peut fonctionner à des vitesses modérément élevées [53] (voir annexe B).

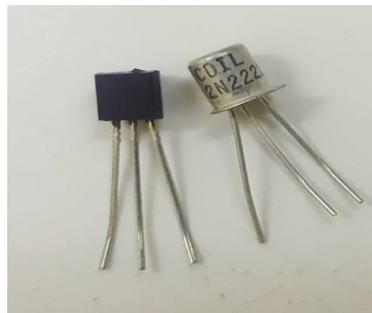


Figure III.10 : Transistor 2N2222.

III.3.4.2 Transistor BD139

Le BD139 de STMicroelectronics (figure III.11) est un transistor NPN basse tension complémentaire traversant dans un boîtier TO-126 (SOT-32). Il est fabriqué en technologie planaire épitaxiale utilisé pour les amplificateurs et les drivers audio, en utilisant des circuits complémentaires ou quasi complémentaires [54] (voir annexe C).

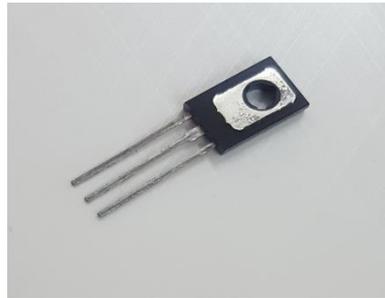


Figure III.11 : Transistor BD139.

III.4 Montages de réalisation

Pour mener à bien ce projet, des montages d'émission et de réception ont été réalisés. Les montages ont été effectués après de nombreux tests dans le but de créer une bonne transmission sans erreur. Le logiciel ISIS Proteus a permis la simulation du travail effectué.

III.4.1 Emission

Au niveau de l'émission, des LEDs de 12 volts ont été choisis pour faire vigeuer d'émetteur Li-Fi. Etant donné que l'Arduino alimente en 5 volts, il a été nécessaire d'avoir recours à une alimentation externe de 12 volts ainsi qu'à un transistor pour pouvoir faire passer la puissance et permettre le contrôle de la LED via l'Arduino.

Le montage d'émission est représenté à la figure III.12.

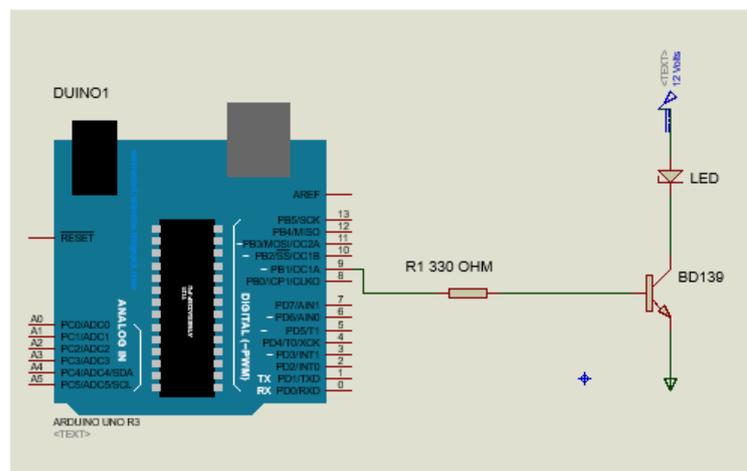


Figure III.12 : Montage d'émission.

III.4.2 Réception

Le montage suivant (figure III.13), représente le montage de réception. Les trois photodétecteurs cités précédemment ont été testé sans modifier le montage. Seul, le composant photodétecteur est remplacé dans chaque cas.

Le comparateur LM393 est chargé de comparer la tension aux bornes du photodétecteur avec une tension de référence réglable. Le potentiomètre permet de régler la sensibilité du photodétecteur, il permet d'ajuster le seuil de déclenchement en fonction du niveau de la lumière. Tandis que le transistor 2N2222 a été utilisé en commutation rapide pour la mise en forme du signal.

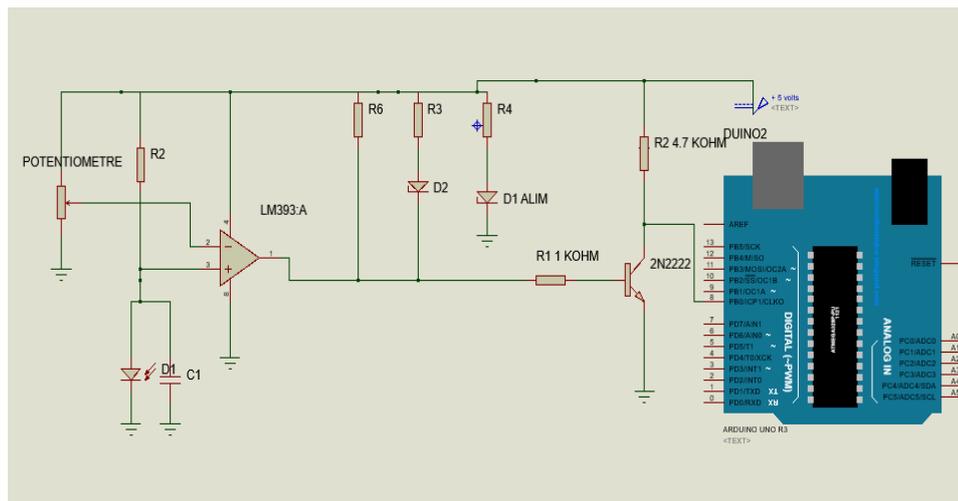


Figure III.13 : Montage de réception.

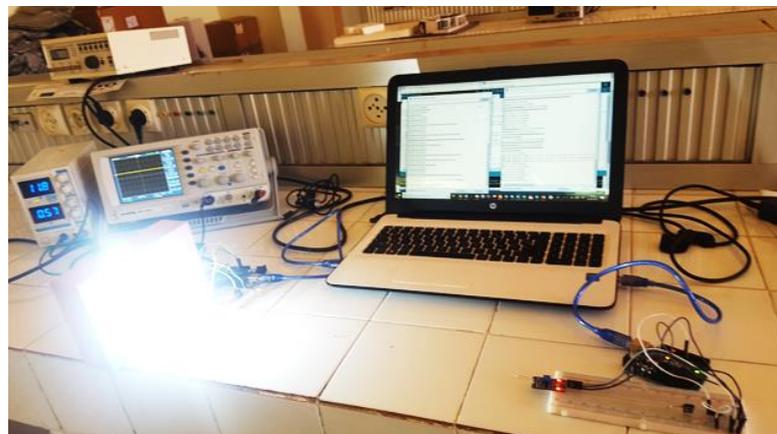


Figure III.14 : Système réalisé au laboratoire.

Pour finir, les deux montages précédents ont été combinés en un seul montage (figure III.15) pour permettre une liaison en mode duplex. Ce système permettra d'émettre et de recevoir simultanément.

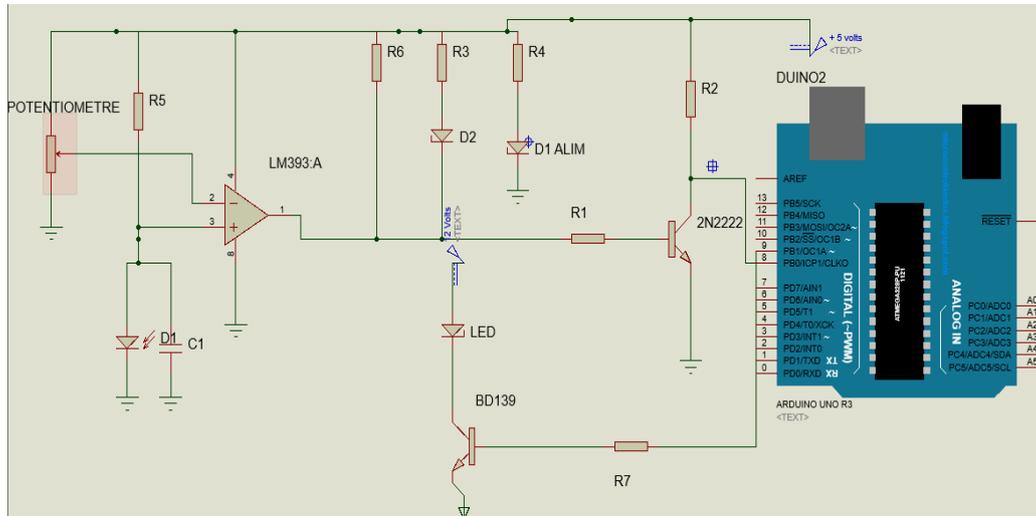


Figure III.15 : Montage émission et réception en mode duplex.

III.5 Programmation

Cette section décrit la partie software de ce projet. Le codage et la modulation utilisés sont présentés.

III.5.1 Codage

Le code ASCII, pour « American Standard Code for Information Interchange » est l'un des plus anciens codes utilisés pour représenter du texte en informatique. Il se base sur un tableau contenant les caractères les plus utilisés en langue anglaise. Il définit 128 caractères numérotés de 0 à 127 et codés en binaire sur 7 bits de 0000000 à 1111111. Le tableau ASCII étendu (annexe D) comprend d'autres caractères en dehors des lettres tels que les symboles et les caractères spéciaux.

III.5.2 Modulation

La modulation On-Off Keying (OOK), comme décrite au cours des chapitres précédents, est la méthode la plus simple pour représenter des données. La valeur logique « 0 » correspond à LOW et la valeur logique « 1 » à HIGH. Dans le cas VLC, cela signifie que la LED est éteinte pour transmettre un zéro et allumée pour transmettre un.

Etant donné que les systèmes Li-Fi sont utilisés pour l'éclairage et la communication, il a été plus judicieux de configurer la LED en état de marche constant jusqu'à une émission de

données. A ce moment-là, uniquement dès le début de la communication, la LED commencera à clignoter.

III.5.3 Algorithme

La figure III.16 représente l'organigramme de l'algorithme de programmation réalisé sous Arduino. Ce programme permet d'envoyer du texte entre deux PCs via une communication Li-Fi à l'aide de deux cartes Arduino Uno.

Chaque carte Arduino est connectée à un PC via les ports COM du PC. Du côté de l'émetteur, une fois le programme compilé et chargé sur la carte, le texte est saisi par l'utilisateur sur un moniteur série d'Arduino. Ces données sont traitées dans le microprocesseur Atmega 328, présent dans la carte Arduino Uno. Les données traitées convertissent les caractères ASCII en bits binaires, qui font clignoter la LED interfacée avec la carte Arduino.

Ce clignotement est capturé par le photodétecteur côté réception, qui est interfacé avec une autre carte Arduino connectée sur un port COM d'un autre PC. Le récepteur accepte les valeurs binaires de l'émetteur et son processeur convertit ces bits en caractères ASCII. Le récepteur possède un dictionnaire dans le code qui lui permet de correspondre chaque caractère alphanumérique au code ASCII reçu. Ces caractères alphanumériques peuvent être visualisés sur le moniteur série du récepteur Arduino Uno.

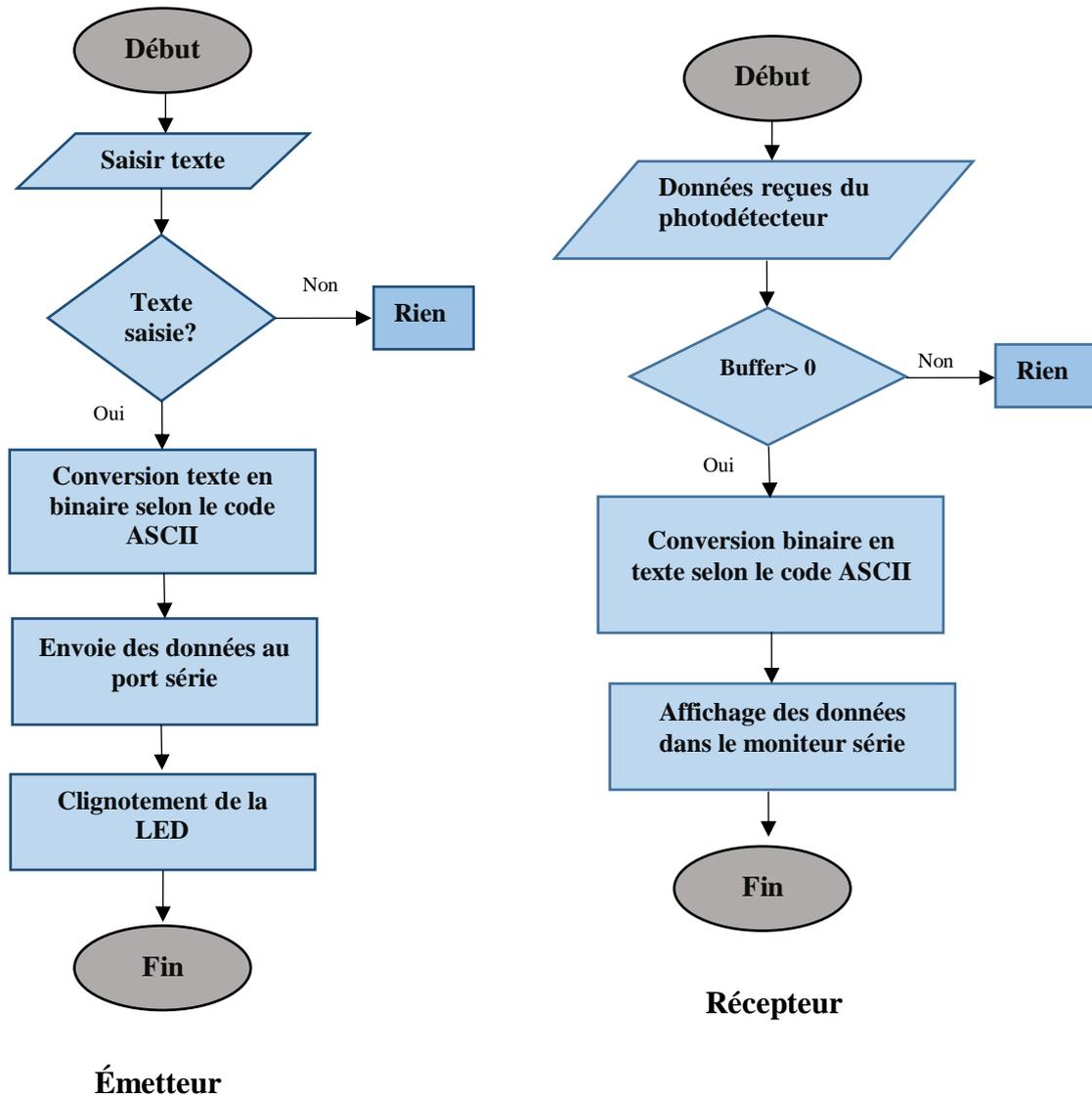


Figure III.16 : Organigramme d'émission et de réception.

III.6 Visualisation de la communication

A titre d'exemple, la figure III.17 représente les fenêtres du moniteur série de l'Arduino lors de l'envoi et de la réception du texte.

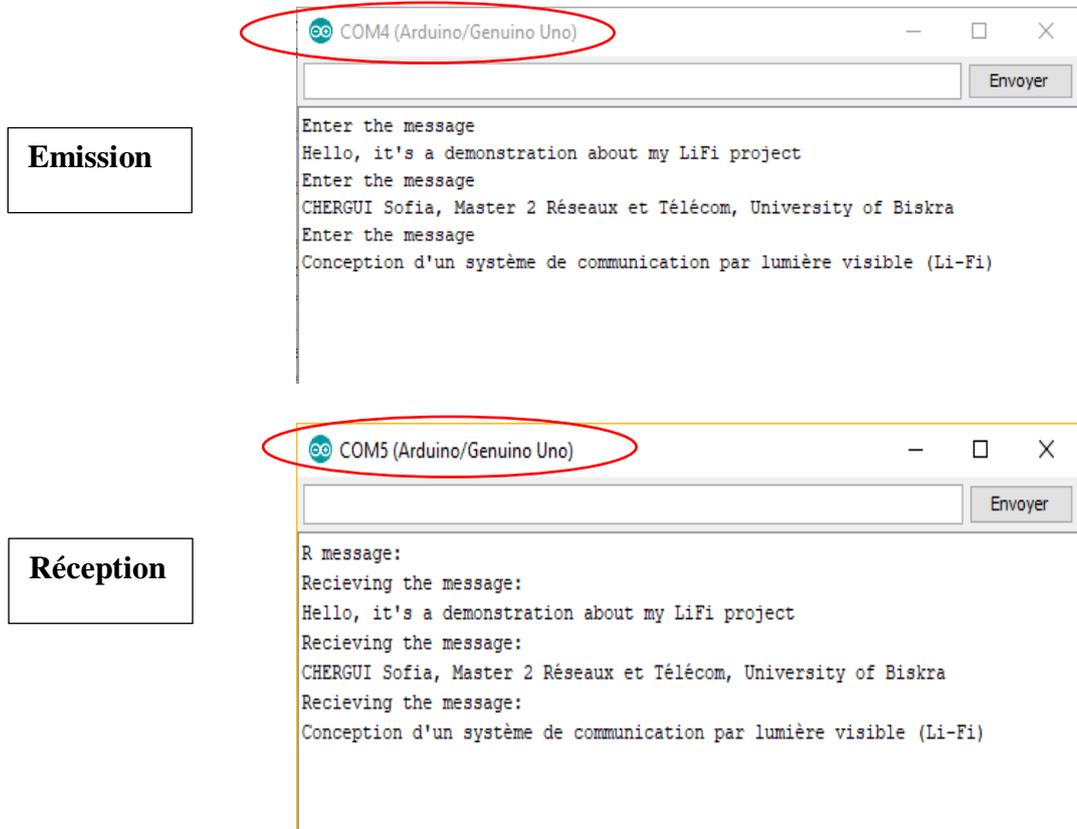


Figure III.17 : Fenêtres du moniteur série.

Les signaux de transmission lors de l'émission et de la réception ont été visualisés à l'aide d'un oscilloscope (figure III.18).

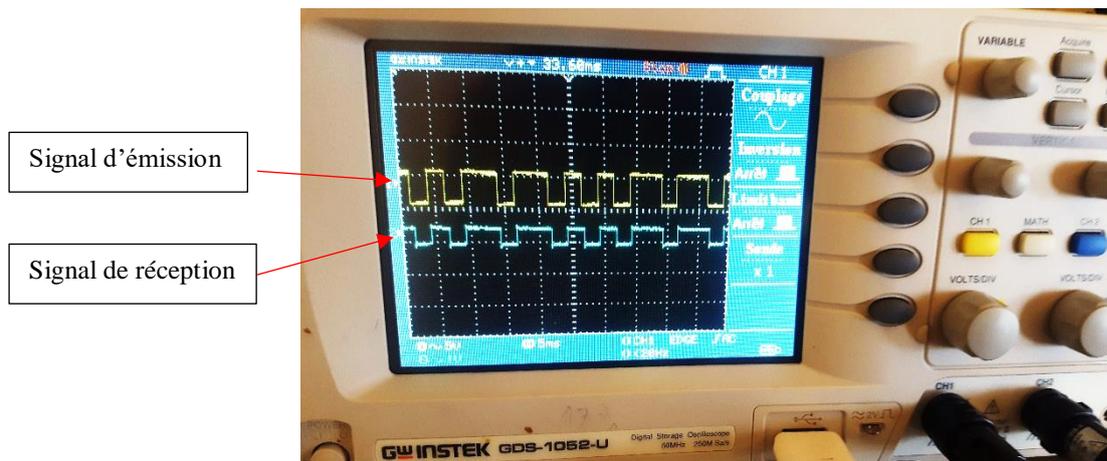


Figure III.18: Signaux de transmission visualisés via l'oscilloscope.

Les deux signaux sont presque identiques, cela assure une bonne transmission et une bonne réception des messages envoyés.

Chaque caractère est transmis sous 8 bits de données, c'est le code ASCII étendu. S'ajoute à cela 1 bit start servant à la synchronisation du récepteur et 1 bit de stop. Le bit start est d'une valeur de « 0 », tandis que le bit stop est égal à « 1 ».

Par exemple, lors de l'envoi du caractère « a » dont le code ASCII est « 01100001 », un bit start et stop seront rajoutés lors de la transmission. Le bit de poids faible (LSB, Least Significant Bit) est le bit le plus à droite soit « 1 », tandis que le bit de poids fort (MSB, Most Significant Bit) est le bit le plus à gauche, « 0 » pour ce cas (voir figure III.19).

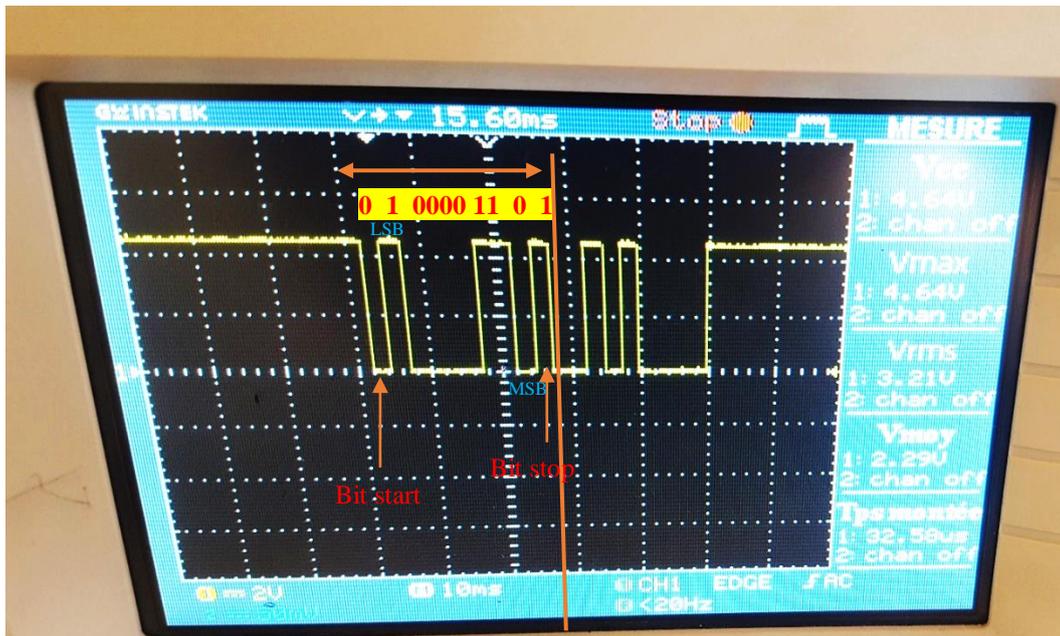


Figure III.19 : Visualisation de l'envoi du caractère « a ».

III.7 Sécurisation de la transmission

Comme vu dans le chapitre précédent, l'avantage que la communication Li-Fi se fait en ligne de vue directe (LoS) et que la lumière ne peut traverser les murs, n'est pas un argument convaincant pour assurer la protection des données. N'importe quel utilisateur qui aura accès à la lumière pourra avoir accès à la donnée. Cela peut causer un risque important dans les espaces publics, là où la lumière peut être accessible par quiconque. Pour s'assurer de la sécurité des données, un algorithme de cryptographie va être implémenté dans le système proposé.

La cryptographie est une des disciplines de la cryptologie s'attachant à protéger des messages (assurant confidentialité, authenticité et intégrité) en s'aidant souvent de secrets ou clés. Elle rend un message inintelligible à autre que qui-de-droit. [55] L'algorithme de

cryptographie choisi est l'algorithme AES pour « Advanced Encryption Standard » car il est actuellement le plus utilisé et le plus sûr.

III.7.1 Présentation de l'algorithme AES

AES est un algorithme symétrique de chiffrement par blocs utilisé dans le monde entier sur des supports matériels et logiciels pour protéger les données sensibles. Il comprend trois algorithmes de chiffrement par blocs : AES-128, AES-192 et AES-256. Chaque code chiffre et déchiffre les données par blocs de 128 bits au moyen de clés cryptographiques de 128, 192 et 256 bits, respectivement.

Les codes symétriques ou à clé secrète utilisent la même clé pour le chiffrement et le déchiffrement. L'expéditeur et le destinataire doivent donc connaître et utiliser la même clé secrète. [56]

C'est un algorithme itératif et chaque itération est appelée un tour (round). Le nombre total de tours (N_r) est de 10, 12 ou 14 lorsque la longueur de la clé est de 128, 192 ou 256 bits respectivement. Chaque tour en AES, sauf le dernier tour, est constitué de quatre opérations : SubBytes, ShiftRows, MixColumns et AddRoundKey. Le flux de décryptage est simplement l'inverse du flux de cryptage et chaque opération est l'inverse de celle correspondante dans le processus de cryptage.

La transformation en tour de AES et ses étapes opèrent sur des résultats intermédiaires, appelés état (state) qui peut être visualisé sous forme de matrice rectangulaire à quatre lignes. Le nombre de colonnes dans cette matrice est noté N_b et est égale à la longueur du bloc en bits divisée par 32. Pour un bloc de données de 128 bits (16 octets), la valeur de N_b est 4, l'état est donc traité comme une matrice 4×4 et chaque élément de la matrice représente un octet. [57]

L'opération SubBytes est la substitution d'octet utilisant une table de substitution (S-box). ShiftRows décale les lignes de la matrice d'état suivant différents décalages. MixColumn est utilisé pour mélanger les données dans chaque colonne de cette matrice et AddRoundKey pour y ajouter un tournement de clé. [58]

L'expansion de clé AES (key expansion) est utilisée pour produire un nombre défini de tours de clés à partir de la clé initiale. Dans AES, la clé initiale est utilisée dans la série initiale d'AES en tant qu'entrée de l'opération AddRoundKey.

La structure de cet algorithme est représenté à la figure III.20.

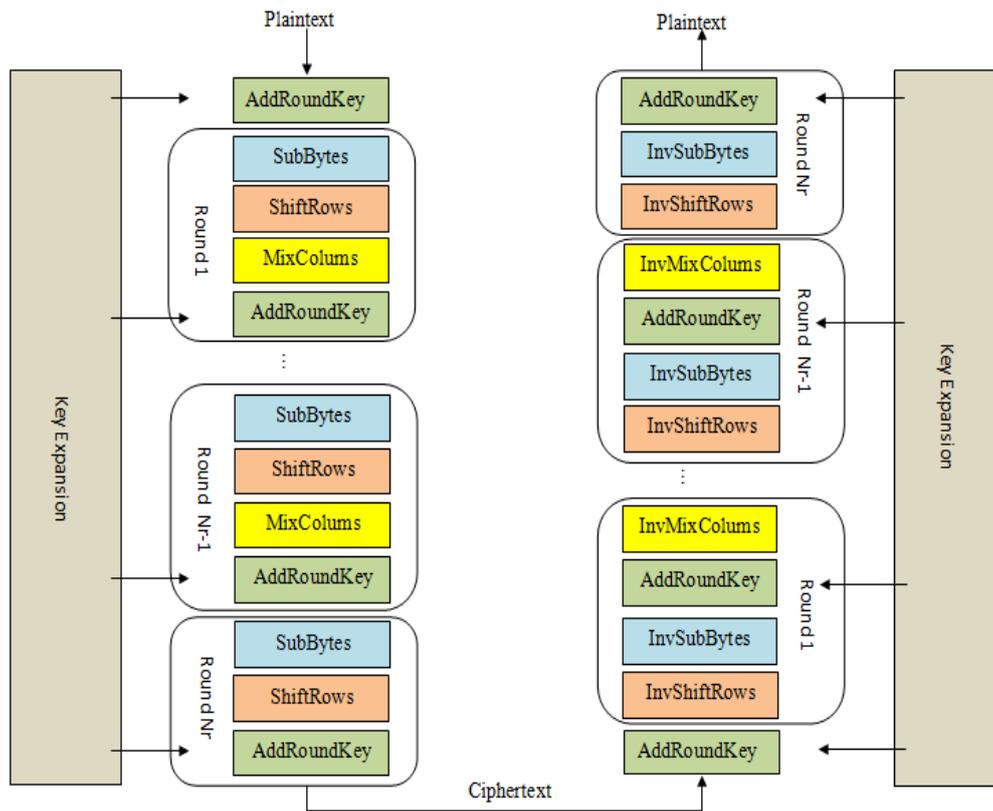


Figure III.20 : Structure de l'algorithme AES. [59]

III.7.1.2 Mode opératoire

Le NIST (National Institute of Standards and Technology) a défini cinq modes de fonctionnement pour AES : le chaînage de bloc de chiffrement (CBC, Cipher Block Chaining), le mode dictionnaire (ECB, Electronic CodeBook), le mode rebouclage du chiffrement (CFB, Cipher FeedBack), le rebouclage de la sortie (OFB, Output FeedBack) et le mode compteur (CTR, Counter). Pour le système Li-Fi réalisé, le mode d'opération CBC a été choisi (figure III.21).

Ce mode exige un vecteur d'initialisation (IV, Initialization Vector) qui soit de la même taille que celle du bloc. L'utilisation d'un IV généré de façon aléatoire empêche de générer un texte chiffré identique à partir de paquets qui ont des données identiques qui s'étendent sur le premier bloc de la taille de bloc de l'algorithme de chiffrement. Le IV est OUXé (XORé) avec le premier bloc de texte en clair avant qu'il soit chiffré. Puis pour les blocs successifs, le précédent bloc de texte chiffré est OUXé avec le texte en clair actuel, avant qu'il soit chiffré. [60]

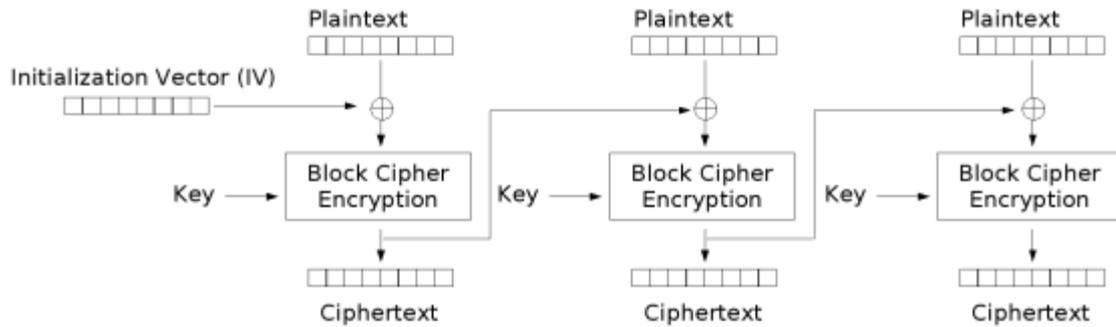


Figure III.21 : Structure du mode CBC. [61]

III.7.1.3 Taille de bloc et bourrage

Etant donné que le texte qui va être saisi par l'utilisateur n'aura pas une taille fixe alors que l'algorithme de chiffrement AES opère sur des blocs de taille fixe, il faut avoir recours à ce qu'on appelle « le bourrage » ou « remplissage » (padding en anglais). Cela consiste à faire en sorte que la taille des données soit compatible avec l'algorithme utilisé de façon à ce que sa longueur devienne divisible par la longueur des blocs de chiffrement.

Le type de « padding » utilisé dans ce système est le PKCS#7 (Public Key Cryptography Standards). Dans ce type de remplissage, chaque octet ajouté aura comme valeur le nombre N qui représente le nombre nécessaire d'octets à ajouter pour atteindre la taille du message souhaitée. [62]

III.7.2 Implémentation de l'algorithme AES-CBC

Pour permettre un bon chiffrement et déchiffrement des données, une suite d'étapes a été programmée.

III.7.2.1 Chiffrement (encryption)

Voici les principales étapes de l'algorithme de cryptographie mis en place pour le chiffrement. Il sera exécuté au niveau de l'émetteur Li-Fi.

Algorithme 1 : chiffrement

Begin

```

Calcul size of the text
Add padding bit
State = plainText
AES-CBC encryption
{ KeyExpansion
AddRoundKey (State, ExpandedKey[0])
for r ← 1 to (Nr - 1)

```

```

        { SubBytes (State, S-box)
        ShiftRows (State)
        MixColumns (State)
        AddRoundKey (State, ExpandedKey[r])}
    end for
    SubBytes (State, S-box)
    ShiftRows (State)
    AddRoundKey (State, ExpandedKey[Nr])
    XOR_block (iv, State)}
    Out = CipherText
End

```

Après la saisie du texte dans le moniteur série, le résultat du chiffrement AES-CBC est représenté à la figure III.22.

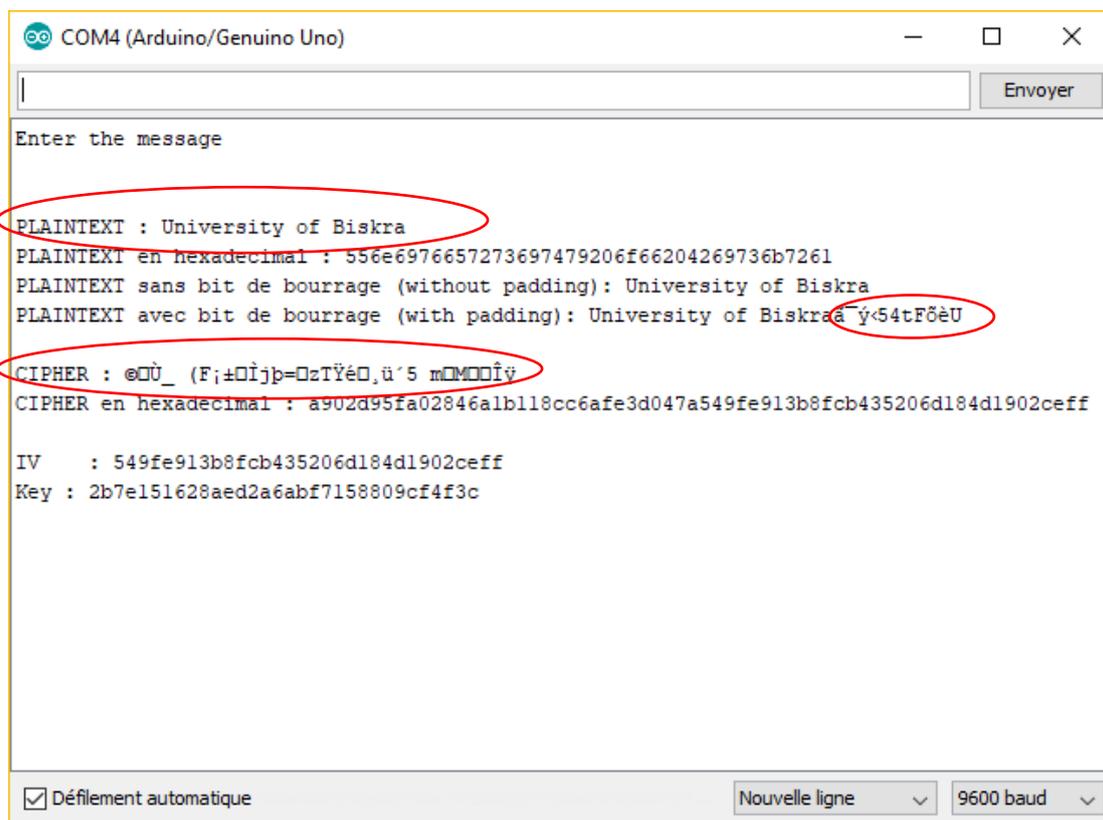


Figure III.22 : Chiffrement AES-CBC.

Des bits de bourrage ont été ajoutés par notre système au texte à envoyer (plaintext) dans le but d'atteindre une valeur de blocs de 16, 24 ou 32 octets, correspondant à 128, 192 et 256 bits respectivement. Une fois la taille de bloc adéquate, le chiffrement AES-CBC peut être appliqué. La valeur de sortie de cet algorithme est le texte chiffré (ciphertext).

III.7.2.2 Déchiffrement (decryption)

Voici les principales étapes de l'algorithme de cryptographie mis en place pour le déchiffrement. Il sera exécuté au niveau du récepteur Li-Fi.

Algorithme 2 : déchiffrement

Begin

```

Calcul size of the ciphertext
State = CipherText
AES-CBC decryption
  { XOR_block (plain, iv)
  KeyExpansion
  AddRoundKey (State, ExpandedKey[0])
  for r ← (Nr - 1) to 1
    { InverseShiftRows (State)
    InverseSubBytes (State, S-box)
    AddRoundKey (State, ExpandedKey[r])
    InverseMixColumns (State) }
  end for
  InverseSubBytes (State, S-box)
  InverseShiftRows (State)
  AddRoundKey (State, ExpandedKey[Nr])
Delete padding bits
out = PlainText

```

End

Au niveau du récepteur, le message a correctement été déchiffré (figure III.23).

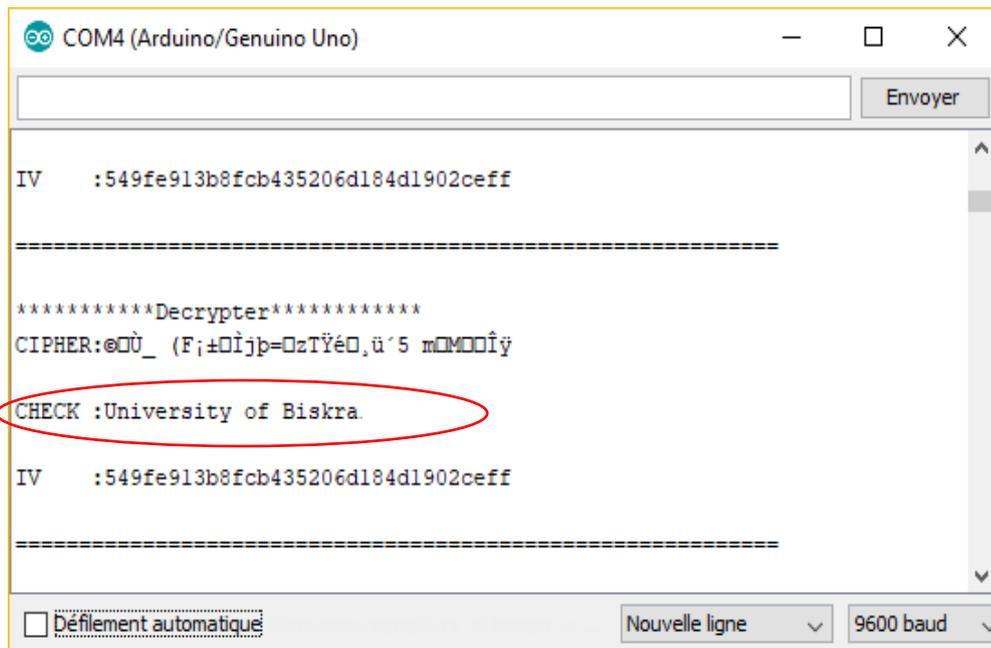


Figure III.23 : Déchiffrement AES-CBC.

III.7.3 Codage Base64

Pour s'immuniser de problème de transmission de certains caractères spéciaux, un codage Base64 a été implémenté dans le système de communication Li-Fi effectué au cours de ce projet.

Le terme Base64 provient d'un codage de transfert de contenu MIME (Multipurpose Internet Mail Extensions) spécifique. Les schémas de codage Base64 sont couramment utilisés lorsqu'il est nécessaire de coder des données binaires qui doivent être stockées et transférées sur un support conçu pour traiter des données textuelles.

Cette transformation permet que les données envoyées ne soient pas modifiées lors du transport. De plus, lors de l'envoi des données binaires, la transcription hexadécimale en ASCII des octets multiplierait la taille par deux, l'encodage en Base64 permet de limiter cette augmentation.

Ce processus de codage consiste à coder chaque groupe de 24 bits successifs de données par une chaîne de 4 caractères. On procède de gauche à droite, en concaténant 3 octets pour créer un seul groupement de 24 bits (8 bits par octet). Ils sont alors séparés en 4 nombres de seulement 6 bits (qui en binaire ne permettent que 64 combinaisons). Chacune des 4 valeurs est enfin représentée (codée) par un caractère de l'alphabet retenu.[63]

Au niveau de l'émission, le ciphertext résultant de l'opération de chiffrement AES-CBC est codé en Base64 et par la suite envoyé (figure III.24).

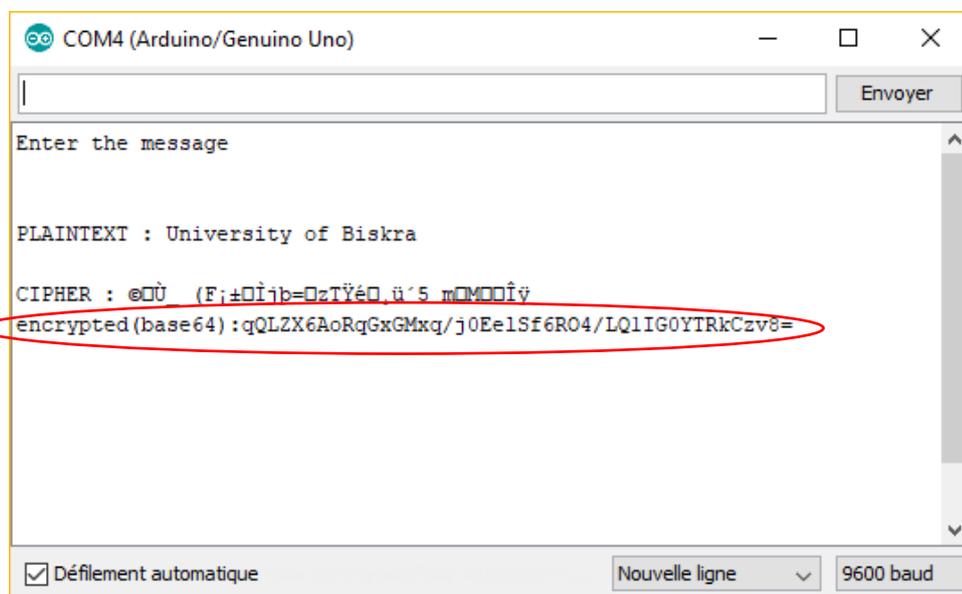


Figure III.24 : Codage Base64.

Le message reçu via la transmission Li-Fi a été décodé et déchiffré sans erreur. Le système conçu est à présent sécurisé. Uniquement le destinataire légitime pourra avoir accès à l'information envoyée.

III.8 Résultats de la transmission avec différents photodétecteurs

Pour tester la fiabilité du système, différents tests ont été effectués en modifiant la distance et le débit de transmission.

Ces tests ont été réalisés avec différents photodétecteurs pour percevoir quel composant électronique a une plus grande sensibilité et un meilleur temps de réponse et est le plus adapté à ce projet.

III.8.1 Variation de la distance

Ce système a été testé sous différentes distances pour percevoir la portée maximale possible de cette communication sans erreur de transmission (figure III.27).

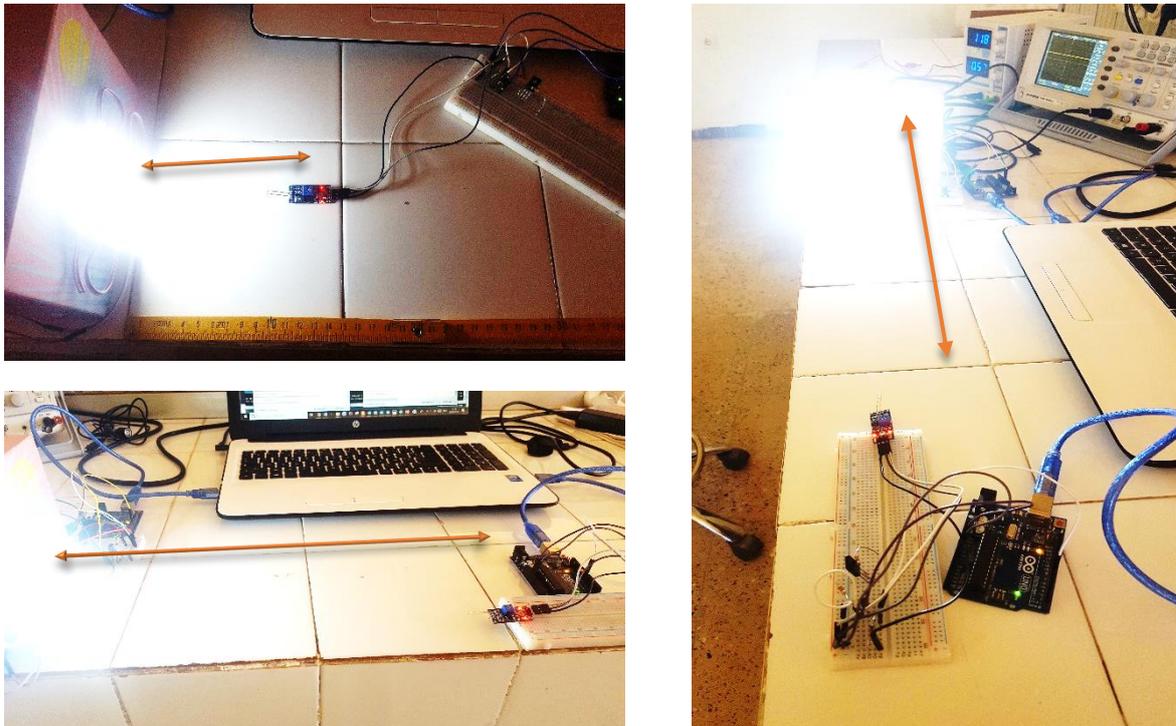


Figure III.27 : Tests de la communication sous différentes distances.

III.8.1.a Récepteur photorésistance

Lors de la réception avec la photorésistance (LDR), la communication est limitée à une distance fixe de 20 cm. Au-delà de cette distance, le taux d'erreur de transmission augmente considérablement.

Le composant LDR n'est pas efficace pour de longues distances. Il en résulte que la sensibilité de ce type de photodétecteur n'est pas adaptée à ce type de communication.

III.8.1.b Récepteur phototransistor

Les différents tests effectués avec ce photodétecteur sont satisfaisant. La distance maximale sans erreur de transmission est au-delà de 2 mètres.

On peut déduire que le phototransistor se caractérise par une sensibilité très élevée.

III.8.1.c Récepteur photodiode

Ce type de photodétecteur n'a pas pu être testé car indisponible en laboratoire et dans plusieurs magasins électroniques. Une commande sur internet a été faite mais la commande n'a pas été reçue à temps.

Théoriquement, la photodiode est moins sensible à la lumière que le phototransistor. On peut en déduire que la distance possible de la communication avec ce type de photodétecteur sera plus courte que celle obtenue avec le phototransistor.

III.8.2 Variation du débit

Ce système a par la suite été testé sous différents débits.

III.8.2.a Photorésistance

Ce composant fonctionne efficacement pour de faibles débits. Plus le débit est élevé, plus le taux d'erreur augmente.

Comme aperçu via l'oscilloscope représenté sur la figure III.28, lors de débit élevé et d'une rapidité de transmission de plus de 9600 bauds, la transmission est incorrecte. Le signal de réception ne correspond pas au signal d'émission.

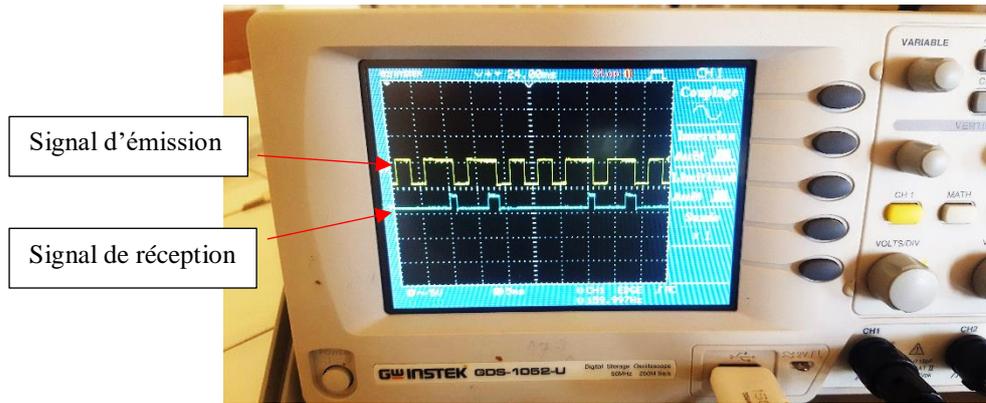


Figure III.28 : Visualisation du signal reçu par la LDR.

On en déduit que le temps de réponse de ce photodétecteur n'est pas adapté aux communications à débit élevé.

III.8.2.b Phototransistor

Avec des débits plus élevés, les phototransistors fonctionnent mais uniquement sur de courtes distances.

Comme apperçu via l'oscilloscope représenté sur la figure III.29, un taux de retard est remarqué lorsque le débit est élevé mais avec courte distance. Ce taux de retard est acceptable car la transmission du texte est correcte.

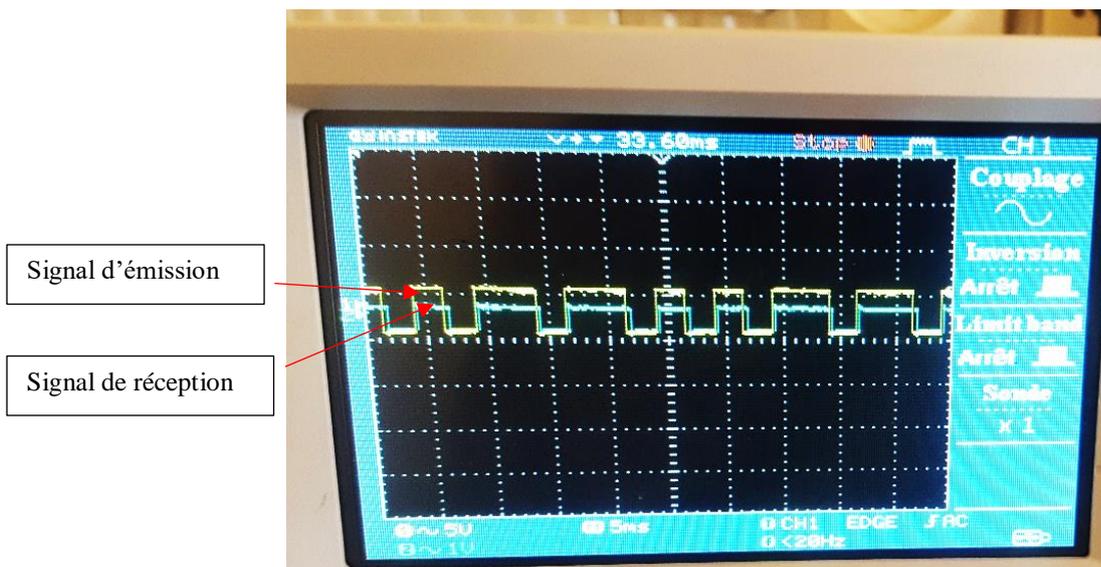


Figure III.29 : Visualisation du signal reçu par le phototransistor.

Lors de débits élevés et de longues distances, la transmission est incorrecte. On en déduit que le temps de commutation du phototransistor est long. Ce photodétecteur n'est donc pas adapté aux débits élevés.

III.8.2.c Photodiode

Théoriquement, le temps de réponse d'une photodiode est court, c'est-à-dire qu'elle est caractérisée par une vitesse de réponse très élevée.

III.9 Résultats finals

En modifiant les distances et les débits de transmission, il en est déduit qu'il y a une relation inverse entre ces deux paramètres. Plus le débit augmente, plus la distance doit être diminuée. Cela est résumé dans la figure III.30.

On peut parler de débit ou de vitesse de transmission car l'augmentation de l'un fait augmenter l'autre.

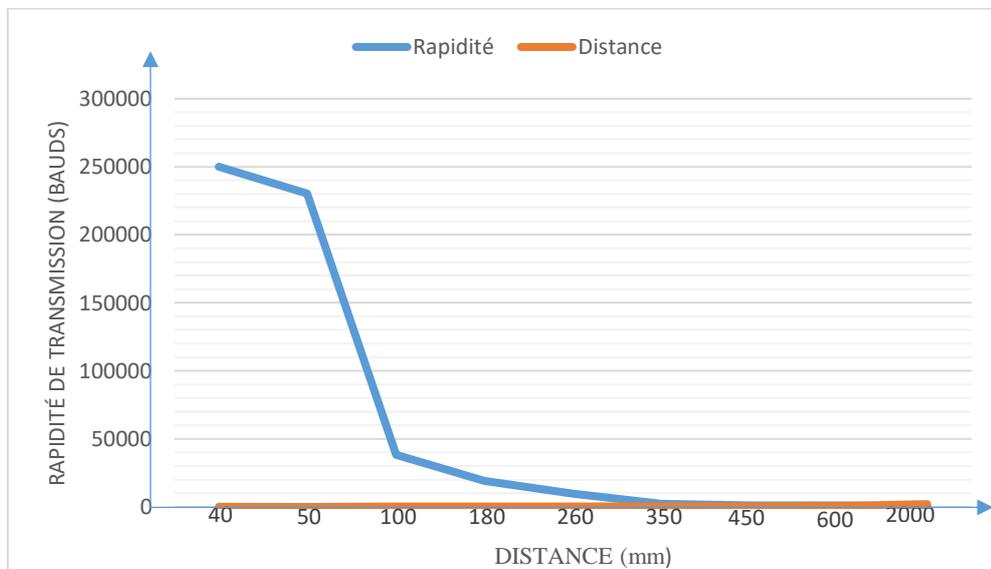


Figure III.30 : Variation de la rapidité en fonction de la distance.

Pour ce qui est des caractéristiques des photodétecteurs sur ce système de communication par lumière visible, cela peut se résumer sur le tableau ci-dessous (tableau III.2):

Tableau III.2 : Caractéristiques des photodétecteurs.

Photodétecteur	Sensibilité	Temps de réponse
Photorésistance	Faible	Lent

Phototransistor	Elevé	Modéré
Photodiode	Modéré	Rapide

Les photodétecteurs les plus adaptés pour ce type de communication sont les phototransistors et les photodiodes. Un compromis existe entre ces deux types de photodétecteurs entre le débit et la distance. Pour de faibles distances et un débit élevé, il sera plus judicieux de choisir une photodiode, tandis que le phototransistor sera plus approprié pour des débits assez faibles mais de longues distances.

Etant donné que la technologie Li-Fi est caractérisée par sa faible portée mais d'un débit allant de 1000 Gbits/s, notre choix premier se portera sur l'utilisation d'une photodiode.

III.10 Conclusion

Au cours de ce chapitre, un système de communication Li-Fi a été proposé. Ce système permet l'envoi de données textuelles entre deux terminaux en mode duplex, cela en utilisant la lumière comme support de transmission. L'envoi de ses données a été sécurisé par l'algorithme de cryptographie AES. C'est un algorithme symétrique de chiffrement par blocs. On entend par symétrique le fait que la même clé est utilisée pour le chiffrement et le déchiffrement.

Pour finir, une étude comparative entre différents photodétecteurs a été effectuée. Il a été constaté que chaque photodétecteur possède des caractéristiques distinctes telles que le temps de réponse et la sensibilité. Le choix approprié d'un photodétecteur se fera certainement selon ces deux paramètres qui feront varier le débit de transmission et/ou la distance de la communication.

Communiquer par la lumière peut être une alternative intéressante aux ondes électromagnétiques si le problème de vue directe ne pose pas de problème.

Conclusion générale

Suite à la demande croissante des données mobiles, le domaine des télécommunications souffre de ce qu'on appelle « le crunch spectral

». Ce terme fait référence au manque potentiel de spectre de fréquence suffisant pour prendre en charge un nombre croissant d'appareils. Le manque de fréquences est un risque dans les télécommunications et les réseaux sans fil, ce qui a des profondes conséquences pour l'avenir immédiat.

Dans ce projet, il a été prouvé que l'utilisation des communications par lumière visible est une alternative intéressante face à ce problème car cette technologie utilise un autre spectre qui est le spectre visible. Communiquer tout en s'éclairant peut certainement être l'avenir d'internet.

Cette étude a commencé par décrire le principe des technologies de communications par lumière visible pour ensuite détailler une de ses applications qui est le Li-Fi, un complément intéressant à la technologie Wi-Fi qui utilise les ondes radios pour la transmission. L'utilisation de cette technologie est encore nouvelle et en plein développement.

Une transmission Li-Fi offre la possibilité de communiquer efficacement par la lumière. Des LEDs ont été utilisées comme émetteur, tandis que le récepteur était à base de photodétecteurs. Cependant, au début des travaux effectués, un enjeu important résidait dans l'obtention d'une transmission Li-Fi efficace. Dans ce contexte, pour mener à bien ce projet dont l'objectif était la conception d'un système de communication Li-Fi, de nombreux tests avec différents photodétecteurs ont été effectués en laboratoire.

Le système réalisé a permis une communication au-delà de 2 mètres, une distance considérable qui n'a pas été atteinte auparavant dans des travaux ultérieurs lors de l'utilisation de la carte Arduino Uno (travaux réalisés par [64,65,66]).

Une fois que la transmission Li-Fi a été efficace, il a été possible de développer le système en se focalisant sur la sécurisation des données. Un algorithme de cryptographie a permis le chiffrement et déchiffrement des données pour assurer leur protection.

La cryptographie est une des disciplines de la cryptologie s'attachant à protéger des messages (assurant confidentialité, authenticité et intégrité) en s'aidant de clés partagées ou non.

Conclusion générale

Elle se distingue de la stéganographie qui fait passer inaperçu un message dans un autre message alors que la cryptographie rend un message inintelligible à autre que qui-de-droit.

Problèmes rencontrés :

- Manque de photodétecteurs disponibles en laboratoire. Un large choix n'était pas à portée de main et les tests effectués étaient donc limités.
- Perte de temps avec la photorésistance qui n'était pas adaptée à ce type de projet.
- Puissance de la carte Arduino très faible et ne dispose pas d'une capacité de stockage élevée pour permettre l'envoi de données plus volumineuses tels que les images ou les vidéos.
- Modules Arduino non disponible en laboratoire tels que les modules SD et Ethernet pour tester la communication Li-Fi via internet.
- Manque de ressources traitant des axes différents de cette technologie qui est encore nouvelle et peu traitée.

Perspectives et travaux futurs :

- Conception de ce système à l'aide d'un microcontrôleur ou un micro-processeur plus puissant tel que le FPGA ou le Raspberry.
- Développer ce système pour permettre l'envoi d'images et de vidéos.
- Implémenter un réseau Li-Fi via une connexion à internet en utilisant un câble Ethernet ou un CPL.
- Création d'une application Android pour permettre la communication Li-Fi entre différents types de terminaux.

Le Li-Fi ouvre de grandes perspectives pour l'ère des objets connectés qui vont être de plus en plus présents dans les objets du quotidien. Grâce à sa bande passante élevée et l'immense capacité du spectre, le Li-Fi pourrait être utilisé en symbiose avec nos réseaux actuels pour les rendre plus efficaces.

- [1] « Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022 », févr. 2019.
- [2] « United states frequency allocation chart », United States Department of Commerce, 2016.
- [3] R. U.-R. Sm, « Utilisation de la lumière visible pour les communications à large bande », Union Internationale des Télécommunications, 2018.
- [4] L. U. Khan, « Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges », *Digital Communications and Networks*, vol. 3, n° 2, p. 78-88, mai 2017.
- [5] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, et P. Mohapatra, « Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges », *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 17, n° 4, p. 2047-2077, Fourthquarter 2015.
- [6] « AASA inc. Li-Fi - Visible Light Communication (VLC) - Light Fidelity (Li-Fi) - LED ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.aasainc.com/vlc.htm>. [Consulté le: 04-févr-2019].
- [7] C. Le Bas, « Système de télésurveillance médicale utilisant la technologie de transmission optique sans fil », Université de Limoges, 2017.
- [8] C. L. Dizes, O. Coponet, R. Pavec, S. Dorgere, et S. Jeanneteau, « Les enjeux et les opportunités offertes face au Wi-Fi », Institut national des sciences appliquées, Rennes, 2015.
- [9] Z. Wang, Q. Wang, W. Huang, et Z. Xu, *Visible light communications: modulation and signal processing*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2017.
- [10] A. Cailean, « Etude et réalisation d'un système de communications par lumière visible (VLC/LiFi). Application au domaine automobile », Thèse de doctorat, Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines, France, 2014.
- [11] P. Goswami et M. K. Shukla, « Design of a Li-Fi Transceiver », *Wireless Engineering and Technology*, vol. 08, n° 04, p. 71-86, 2017.
- [12] N. Kumar, « Visible Light Communication Based Traffic Information Broadcasting Systems », *International Journal of Future Computer and Communication*, p. 26-30, 2014.
- [13] S. Dimitrov et H. Haas, *Principles of LED Light Communications*, Cambridge University Press. 2015.
- [14] T. Cevik et S. Yilmaz, « An Overview of Visible Light Communication Systems », *International journal of Computer Networks & Communications*, vol. 7, n° 6, p. 139-150, nov. 2015.
- [15] M. Uysal, F. Miramirkhani, O. Narmanlioglu, T. Baykas, et E. Panayirci, « IEEE 802.15.7r1 Reference Channel Models for Visible Light Communications », *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, n° 1, p. 212-217, janv. 2017.
- [16] « IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks–Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light », *IEEE Std 802.15.7-2011*, p. 1-309, sept. 2011.
- [17] A. Boucouvalas, P. Chatzimisios, Z. Ghassemlooy, M. Uysal, et K. Yiannopoulos, « Standards for indoor Optical Wireless Communications », *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, n° 3, p. 24-31, mars 2015.
- [18] E. Ramadhani et G. P. Mahardika, « The Technology of LiFi: A Brief Introduction », *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 325, p. 11, mars 2018.
- [19] J. Albà, « Development of embedded transmitter for visible light communication system for indoor environment », Master en science de l'ingénieur et gestion des télécommunications, Université polytechnique de Catalogne, 2014.
- [20] J. VERNEZ, « Adaptation de la couche MAC du standard IEEE 802.15.4 à une couche physique Ultra Wide Band », La Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Yverdon-les-Bains, Suisse, 2003.

Bibliographie

- [21] G. Blinowski et K. Szczypiorski, « Steganography in VLC Systems », p. 25, 2017.
- [22] C. Medina, M. Zambrano, et K. Navarro, « LED BASED VISIBLE LIGHT COMMUNICATION: TECHNOLOGY, APPLICATIONS AND CHALLENGES – A SURVEY », vol. 8, n° 4, p. 15, 2015.
- [23] M. Falcitelli et P. Pagano, « Visible Light Communication for Cooperative ITS », in *Intelligent Transportation Systems*, vol. 52, M. Alam, J. Ferreira, et J. Fonseca, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2016, p. 19-47.
- [24] « An IEEE Standard for Visible Light Communications | Visible Light Communications ». [En ligne]. Disponible sur: <http://visiblelightcomm.com/an-ieee-standard-for-visible-light-communications/>. [Consulté le: 18-mars-2019].
- [25] « EP-Light Visible Light Communication BoosterPack - MSP Microcontroller Projects - Launch Your Design - TI E2E Community ». [En ligne]. Disponible sur: <https://e2e.ti.com/support/archive/launchyourdesign/m/msp430microcontrollerprojects/665142>. [Consulté le: 18-mars-2019].
- [26] S. Vijay et K. Geetha, « A Survey on visible light communication appliances used in inter-vehicular and indoor communication », *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 11, n° 7, p. 4893-4897, 2016.
- [27] A. Cordier et R. Vandepopeliere, « Le Li-Fi », *Printemps des Sciences - Exposition des Sciences*, Bruxelles, 2017.
- [28] S. Thakur, « Li-Fi Technology ». [En ligne]. Disponible sur: www.studymafia.org. [Consulté le: 01-avr-2019].
- [29] P. Verma, D. J. Shekhar, et D. A. Asthana, « Light-Fidelity (Li-Fi): Transmission of Data through Light of Future Technology », p. 12, 2015.
- [30] « LIFI - Light Fidelity : Internet par lampe LED - 14 milliards de point LIFI d'ici 2020 ans est-ce réaliste?LiFi - Li-Fi and Visible Light Communication - concept and reality », *Tactis*. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.tactis.fr/nos-actualites/lifi-internet-par-lampe-led-revolution-ou-utopie/>. [Consulté le: 02-avr-2019].
- [31] H. D. Ahlawat, G. Menon, et G. Chhabra, « Advanced Light Fidelity (Li-Fi) System », vol. 03, n° 04, p. 4, 2016.
- [32] . Hikmatyarsyah, S. Rahardjo, et J. Junde, « Light Fidelity (Li-Fi): Security and Market Sector »., in *Proceedings of the 7th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology*, Prague, Czech Republic, 2019, p. 154-162.
- [33] CEA, « Le CEA-Leti et LUCIOM développent le LI-FI haut-débit », *CEA/Espace Presse*, 10-sept-2014. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.cea.fr/presse/Pages/actualites-communiques/ntic/Leti-LUCIOM-LI-FI-haut-débit.aspx>. [Consulté le: 03-avr-2019].
- [34] C. Jurczak, « Le LiFi par Lucibel : Illuminer les Télécommunications », p. 18, 2017.
- [35] M. S. Islim et H. Haas, « Modulation Techniques for Li-Fi », p. 12, 2016.
- [36] Y. Wang, X. Wu, et H. Haas, « Resource Allocation in LiFi OFDMA Systems », in *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, Singapore, 2017, p. 1-6.
- [37] H. Haas, C. Chen, et D. O'Brien, « A guide to wireless networking by light », *Progress in Quantum Electronics*, vol. 55, p. 88-111, sept. 2017.
- [38] « The World is Getting a Global LiFi Standard - pureLiFi ». [En ligne]. Disponible sur: <https://purelifi.com/lifi-is-getting-a-global-standard/>. [Consulté le: 08-avr-2019].
- [39] « Lucibel : souhaite la bienvenue à l'IEEE 802.11bb, futur standard LiFi | Zone bourse ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.zonebourse.com/LUCIBEL-16911681/actualite/Lucibel-souhaite-la-bienvenue-a-l-IEEE-802-11bb-futur-standard-LiFi-26975065/?iCStream=1>. [Consulté le: 09-avr-2019].

- [40] F. Aftab, « POTENTIALS AND CHALLENGES OF LIGHT FIDELITY BASED INDOOR COMMUNICATION SYSTEM », *International Journal of New Computer Architectures and their Applications*, vol. 6, n° 3, p. 91-102, 2016.
- [41] M. Francony, « Lux, La revue de l'éclairage », p. 35, 2016.
- [42] M. A. Hadi, « Wireless Communication tends to Smart Technology Li-Fi and its comparison with Wi-Fi », *American Journal of Engineering Research*, p. 8, 2016.
- [43] R. Sowmya Nayaki, H. P. Supriya, G. S. Sindhu, et M. Pavithra, « Li-Fi(Light-Fidelity) Based Secured Communication », *International Journal of Science, Engineering and Technology*, 2019.
- [44] « Light Fidelity (LiFi) Internet Service Provider Company », *oledcomm*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.oledcomm.net/>. [Consulté le: 29-avr-2019].
- [45] « LOCODUINO - Qu'est ce qu'une carte Arduino ? » [En ligne]. Disponible sur: <https://www.locoduino.org/spip.php?article8>. [Consulté le: 17-mai-2019].
- [46] F. Bouquet et J. Bobroff, « MICROCONTROLEUR ARDUINO ». Université Paris Sud, 2015.
- [47] « Référence Arduino français Main/Materiel Uno ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.mon-club-elec.fr/pmwiki_reference_arduino/pmwiki.php?n=Main.MaterielUno. [Consulté le: 17-mai-2019].
- [48] « Diode électroluminescente ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.composelec.com/diode_electroluminescente.php. [Consulté le: 27-mai-2019].
- [49] « Photodétecteur », *Wikipédia*. 21-mars-2016.
- [50] « La photorésistance ou LDR ». [En ligne]. Disponible sur: <https://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM24/RM24B/RM24B10.html>. [Consulté le: 12-juin-2019].
- [51] « Comment utiliser une photodiode / Wjhsathletics.com ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.wjhsathletics.com/comment-utiliser-une-photodiode.html>. [Consulté le: 13-juin-2019].
- [52] « Photodiode », *Wikipédia*. 27-févr-2019.
- [53] « 2N2222 », *Wikipedia*. 25-oct-2018.
- [54] « ELECTRONIQUE 3D - Le transistor BD 139 ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.electronique-3d.fr/Le_transistor_BD139.html. [Consulté le: 12-juin-2019].
- [55] « Cryptographie », *Wikipédia*. 09-mai-2019.
- [56] « Que signifie AES (Advanced Encryption Standard)? - Definition IT de Whatis.fr », *Whatis.com/fr*. [En ligne]. Disponible sur: <https://whatis.techtarget.com/fr/definition/AES-Advanced-Encryption-Standard>. [Consulté le: 16-juin-2019].
- [57] M. Vaidehi et B. J. Rabi, « Design and analysis of AES-CBC mode for high security applications », in *Second International Conference on Current Trends In Engineering and Technology - ICCTET 2014*, Coimbatore, India, 2014, p. 499-502.
- [58] U. Arom-oon, « An AES cryptosystem for small scale network », in *2017 Third Asian Conference on Defence Technology (ACDT)*, Phuket, Thailand, 2017, p. 49-53.
- [59] « The Advanced Encryption Standard (AES) Algorithm | CommonLounge ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.commonlounge.com/discussion/e32fdd267aaa4240a4464723bc74d0a5>. [Consulté le: 17-juin-2019].
- [60] S. Frankel, R. Glenn, et S. Kelly, « L'algorithme de chiffrement AES-CBC et son utilisation avec IPsec », p. 9.
- [61] « Intégration d'un algorithme cryptographique symétrique dans OpenSSL et NSS / GLMF-135 / GNU/Linux Magazine / Connect - Edition Diamond ». [En ligne]. Disponible sur: <https://connect.ed-diamond.com/GNU-Linux-Magazine/GLMF-135/Integration-d-un->

Bibliographie

- algorithme-cryptographique-symetrique-dans-OpenSSL-et-NSS. [Consulté le: 23-juin-2019].
- [62] « Padding (cryptography) », *Wikipedia*. 15-mars-2019.
- [63] « Base64 », *Wikipédia*. 30-avr-2019.
- [64] S. S. AL-Fareed, N. F. AL-Bana'a, et G. Mohammed Mansoor, « Li-Fi », Sana'a University, Yemen, 2016.
- [65] K. R. Rakesh, C. N. Dhanalakskmi, A. Pavithra, et H. D. Pavithra, « PC to PC File Transmission using Li-Fi Technology », Bengaluru, 2018.
- [66] A. Vinnarasi et S. T. Aarthy, « TRANSMISSION OF DATA, AUDIO SIGNAL AND TEXT USING LI-FI », *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 117, n° 17, p. 179-186, 2017.

ANNEXE

Annexe A : Phototransistor BPW40

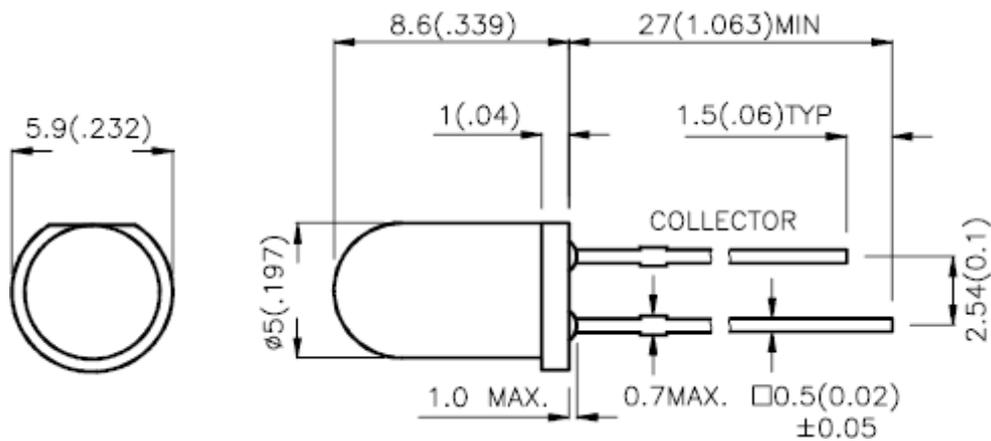
Features

- MECHANICALLY AND SPECTRALLY MATCHED TO THE BPW 40 INFRARED EMITTING LED LAMP.
- WATER CLEAR LENS

Description

Made with NPN silicon phototransistor chips

Package Dimensions



Notes:

1. All Dimensions are in millimeters (inches).
2. Tolerance is ± 0.25 (0.01") unless otherwise noted.
3. Lead spacing is measured where the lead emerge package.
4. Specifications are subject to change without notice.

Electrical / Optical Characteristics at $T_A=25^\circ\text{C}$

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit	Test Condition
$V_{BR\ CE0}$	Collector-to-Emitter Breakdown Voltage	30	-	-	V	$I_C=100\mu\text{A}$ $E_e=0\text{mW/cm}^2$
$V_{BR\ EC0}$	Emitter-to-Collector Breakdown Voltage	5	-	-	V	$I_E=100\mu\text{A}$ $E_e=0\text{mW/cm}^2$
$V_{CE\ (SAT)}$	Collector-to-Emitter Saturation Voltage	-	-	0.8	V	$I_C=2\text{mA}$ $E_e=20\text{mW/cm}^2$
I_{C0}	Collector Dark Current	-	-	100	nA	$V_{CE}=10\text{V}$ $E_e=0\text{mW/cm}^2$
T_R	Rise Time (10% to 90%)	-	3	-	μs	$V_{CE}=5\text{V}$ $I_C=1\text{mA}$ $R_L=1000\Omega$
T_F	Fall Time (90% to 10%)	-	3	-	μs	
$I_{(ON)}$	On State Collector Current	0.1	0.5	-	mA	$V_{CE}=5\text{V}$ $E_e=1\text{mW/cm}^2$ $\lambda=940\text{nm}$

Absolute Maximum Ratings at $T_A=25^\circ\text{C}$

Parameter	Maximum Rating
Collector-to-Emitter Breakdown Voltage	30V
Emitter-to-Collector Breakdown Voltage	5V
Power Dissipation at (or below) 25°C Free Air Temperature	100mW
Operating Temperature Range	$-40^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	$-40^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$
Lead soldering Temperature ($>5\text{mm}$ for 5sec)	260°C

Annexe B : NPN switching transistors 2N2222; 2N2222A

FEATURES

- High current (max. 800 mA)
- Low voltage (max. 40 V).

APPLICATIONS

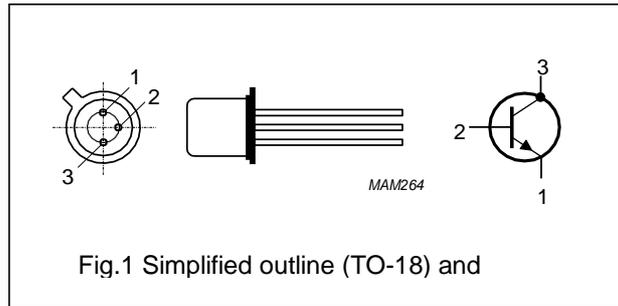
- Linear amplification and switching.

DESCRIPTION

NPN switching transistor in a TO-18 metal package. PNP complement: 2N2907A.

PINNING

PIN	DESCRIPTION
1	emitter
2	base
3	collector, connected to case



QUICK REFERENCE DATA

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_{CBO}	collector-base voltage	open emitter			
	2N2222		–	60	V
	2N2222A		–	75	V
V_{CEO}	collector-emitter voltage	open base			
	2N2222		–	30	V
	2N2222A		–	40	V
I_C	collector current (DC)		–	800	mA
P_{tot}	total power dissipation	$T_{amb} \leq 25\text{ }^\circ\text{C}$	–	500	mW
h_{FE}	DC current gain	$I_C = 10\text{ mA}; V_{CE} = 10\text{ V}$	75	–	
f_T	transition frequency	$I_C = 20\text{ mA}; V_{CE} = 20\text{ V}; f = 100\text{ MHz}$	250	–	MHz
	2N2222A		300	–	MHz
t_{off}	turn-off time	$I_{Con} = 150\text{ mA}; I_{Bon} = 15\text{ mA}; I_{Boff} = -15\text{ mA}$	–	250	ns

LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V _{CBO}	collector-base voltage	open emitter			
	2N2222		–	60	V
	2N2222A		–	75	V
V _{CEO}	collector-emitter	open base			
	voltage 2N2222		–	30	V
	2N2222A		–	40	V
V _{EBO}	emitter-base voltage	open collector			
	2N2222		–	5	V
	2N2222A		–	6	V
I _C	collector current (DC)		–	800	mA
I _{CM}	peak collector current		–	800	mA
I _{BM}	peak base current		–	200	mA
P _{tot}	total power dissipation	T _{amb} ≤ 25 °C	–	500	mW
		T _{case} ≤ 25 °C	–	1.2	W
T _{stg}	storage temperature		–65	+150	°C
T _j	junction temperature		–	200	°C
T _{amb}	operating ambient temperature		–65	+150	°C

THERMAL CHARACTERISTICS

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	VALUE	UNIT
R _{th j-a}	thermal resistance from junction to ambient	in free air	350	K/W
R _{th j-c}	thermal resistance from junction to case		146	K/W

Annexe C : Transistor BD139

FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR™

BD135/137/139

**Medium Power Linear
and Switching
Applications**

- Complement to BD136, BD138 and BD140 respectively

NPN Epitaxial Silicon Transistor

Absolute Maximum Ratings $T_C=25^\circ\text{C}$
unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CBO}	Collector-Base Voltage : BD135	45	V
	: BD137	60	V
	: BD139	80	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage : BD135	45	V
	: BD137	60	V
	: BD139	80	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage	5	V
I_C	Collector Current (DC)	1.5	A
I_{CP}	Collector Current (Pulse)	3.0	A
I_B	Base Current	0.5	A
P_C	Collector Dissipation ($T_C=25^\circ\text{C}$)	12.5	W
P_C	Collector Dissipation ($T_a=25^\circ\text{C}$)	1.25	W
T_J	Junction Temperature	150	$^\circ\text{C}$
T_{STG}	Storage Temperature	- 55 ~ 150	$^\circ\text{C}$



Electrical Characteristics $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Units	
$V_{CEO(sus)}$	Collector-Emitter Sustaining Voltage : BD135	$I_C = 30\text{mA}, I_B = 0$	45			V	
	: BD137		60			V	
	: BD139		80			V	
I_{CBO}	Collector Cut-off Current	$V_{CB} = 30\text{V}, I_E = 0$			0.1	μA	
I_{EBO}	Emitter Cut-off Current	$V_{EB} = 5\text{V}, I_C = 0$			10	μA	
h_{FE1}	DC Current Gain : ALL DEVICE	$V_{CE} = 2\text{V}, I_C = 5\text{mA}$	25				
h_{FE2}			: BD135	25			
h_{FE3}				: BD137, BD139	40		250
			40			160	
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 500\text{mA}, I_B = 50\text{mA}$			0.5	V	
$V_{BE(on)}$	Base-Emitter ON Voltage	$V_{CE} = 2\text{V}, I_C = 0.5\text{A}$			1	V	

BD135/137/139

Annexe D : ASCII Table

(ASCII = American Standard Code for Information Interchange)

Decimal	Octal	Hex	Binary	Value
-----	-----	---	-----	-----
000	000	000	00000000	NUL (Null char \0)
001	001	001	00000001	SOH (Start of Header)
002	002	002	00000010	STX (Start of Text)
003	003	003	00000011	ETX (End of Text)
004	004	004	00000100	EOT (End of Transmission)
005	005	005	00000101	ENQ (Enquiry)
006	006	006	00000110	ACK (Acknowledgment)
007	007	007	00000111	BEL (Bell \a)
008	010	008	00001000	BS (Backspace \b)
009	011	009	00001001	HT (Horizontal Tab \t)
010	012	00A	00001010	LF (Line Feed \n)
011	013	00B	00001011	VT (Vertical Tab \v)
012	014	00C	00001100	FF (Form Feed \f)
013	015	00D	00001101	CR (Carriage Return \r)
014	016	00E	00001110	SO (Shift Out)
015	017	00F	00001111	SI (Shift In)
016	020	010	00010000	DLE (Data Link Escape)
017	021	011	00010001	DC1 (XON) (Device Control 1)
018	022	012	00010010	DC2 (Device Control 2)
019	023	013	00010011	DC3 (XOFF) (Device Control 3)
020	024	014	00010100	DC4 (Device Control 4)
021	025	015	00010101	NAK (Negative Acknowledgement)
022	026	016	00010110	SYN (Synchronous Idle)
023	027	017	00010111	ETB (End of Trans. Block)
024	030	018	00011000	CAN (Cancel)
025	031	019	00011001	EM (End of Medium)
026	032	01A	00011010	SUB (Substitute)
027	033	01B	00011011	ESC (Escape)
028	034	01C	00011100	FS (File Separator)
029	035	01D	00011101	GS (Group Separator)
030	036	01E	00011110	RS (Request to Send)
				(Record Separator)
031	037	01F	00011111	US (Unit Separator)
032	040	020	00100000	SP (Space)
033	041	021	00100001	! (exclamation mark)
034	042	022	00100010	" (double quote)
035	043	023	00100011	# (number sign)
036	044	024	00100100	\$ (dollar sign)
037	045	025	00100101	% (percent)
038	046	026	00100110	& (ampersand)
039	047	027	00100111	' (single quote)
040	050	028	00101000	((left/opening parenthesis)
041	051	029	00101001) (right/closing parenthesis)
042	052	02A	00101010	* (asterisk)
043	053	02B	00101011	+ (plus)
044	054	02C	00101100	, (comma)
045	055	02D	00101101	- (minus or dash)
046	056	02E	00101110	. (dot)
047	057	02F	00101111	/ (forward slash)
048	060	030	00110000	0
049	061	031	00110001	1
050	062	032	00110010	2
051	063	033	00110011	3
052	064	034	00110100	4
053	065	035	00110101	5

Annexe

054	066	036	00110110	6	
055	067	037	00110111	7	
056	070	038	00111000	8	
057	071	039	00111001	9	
058	072	03A	00111010	:	(colon)
059	073	03B	00111011	;	(semi-colon)
060	074	03C	00111100	<	(less than)
061	075	03D	00111101	=	(equal sign)
062	076	03E	00111110	>	(greater than)
063	077	03F	00111111	?	(question mark)
064	100	040	01000000	@	(AT symbol)
065	101	041	01000001	A	
066	102	042	01000010	B	
067	103	043	01000011	C	
068	104	044	01000100	D	
069	105	045	01000101	E	
070	106	046	01000110	F	
071	107	047	01000111	G	
072	110	048	01001000	H	
073	111	049	01001001	I	
074	112	04A	01001010	J	
075	113	04B	01001011	K	
076	114	04C	01001100	L	
077	115	04D	01001101	M	
078	116	04E	01001110	N	
079	117	04F	01001111	O	
080	120	050	01010000	P	
081	121	051	01010001	Q	
082	122	052	01010010	R	
083	123	053	01010011	S	
084	124	054	01010100	T	
085	125	055	01010101	U	
086	126	056	01010110	V	
087	127	057	01010111	W	
088	130	058	01011000	X	
089	131	059	01011001	Y	
090	132	05A	01011010	Z	
091	133	05B	01011011	[(left/opening bracket)
092	134	05C	01011100	\	(back slash)
093	135	05D	01011101]	(right/closing bracket)
094	136	05E	01011110	^	(caret/circumflex)
095	137	05F	01011111	_	(underscore)
096	140	060	01100000		
097	141	061	01100001	a	
098	142	062	01100010	b	
099	143	063	01100011	c	
100	144	064	01100100	d	
101	145	065	01100101	e	
102	146	066	01100110	f	
103	147	067	01100111	g	
104	150	068	01101000	h	
105	151	069	01101001	i	
106	152	06A	01101010	j	
107	153	06B	01101011	k	
108	154	06C	01101100	l	
109	155	06D	01101101	m	
110	156	06E	01101110	n	
111	157	06F	01101111	o	
112	160	070	01110000	p	
113	161	071	01110001	q	
114	162	072	01110010	r	
115	163	073	01110011	s	
116	164	074	01110100	t	
117	165	075	01110101	u	
118	166	076	01110110	v	

Annexe

119	167	077	01110111	w	
120	170	078	01111000	x	
121	171	079	01111001	y	
122	172	07A	01111010	z	
123	173	07B	01111011	{	(left/opening brace)
124	174	07C	01111100		(vertical bar)
125	175	07D	01111101	}	(right/closing brace)
126	176	07E	01111110	~	(tilde)
127	177	07F	01111111	DEL	(delete)